ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ И ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ

КУРСОВАЯ РАБОТА ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ»

«Численное моделирование формирования и дифракции кольцевого пучка с вихревой фазовой дислокацией»

Выполнил студент 2 курса 213 группы
Сойфер Федор Игоревич

Научный руководитель
к.ф.-м.н., доцент
Шленов Святослав Александрович

Москва
2019 г.

Аннотация

Вихревые оптические пучки - это пучки с винтовой дислокацией фазы. Ее основное свойство состоит в том, что при обходе вокруг нее фаза изменяется на число, кратное 2π. Пучки с одной дислокацией фазы на оптической оси являются трубчатыми с нулевым значением интенсивности в центре пучка. Такая структура светового поля является устойчивой и представляет интерес для многих приложений.

Формирование таких пучков является непростой задачей. В данной работе предпринимается попытка численно смоделировать получение вихревого пучка из гауссового, прошедшего фазовый транспарант с дислокацией фазы.

Содержание

1. Введение

1.1. Вихревые световые пучки

В последнее время специалисты в области лазерной физики стали проявлять все больший интерес к световым полям с винтовыми возмущениями волнового фронта. Такого рода возмущения обусловливают вихревой характер распространения световой энергии, что позволяет говорить о существовании оптических вихрей.

Образование вихрей обусловлено появлением на волновом фронте особых точек - винтовых дислокаций (ВД). В этих точках амплитуда световых колебаний обращается в нуль, а значение фазы не определено. На поверхности волнового фронта может возникать как единичная ВД, так и система дислокаций. В данной работе рассматривается случай с одной винтовой дислокацией, расположенной на оси распространения оптического пучка. При математическом описании такой особенности принято говорить о наличии сингулярности.

Наиболее часто дислокации волнового фронта лазерных пучков, обусловливающие вихревую структуру светового поля, наблюдаются при распространении излучения через оптические элементы и среды со случайными неоднородностями показателя преломления. [3]

Существуют несколько способов генерции «вортексов», одним из которых является прохождение гауссовского пучка через фазовую пластинку. Исходный пучок изображен на рис. 1.1 и представляет собой унимодальное распределение с максимальной интенсивностью на оси пучка.

Кардинальное отличие исследуемого оптического вихря от гауссовского пучка состоит в ненулевой интенсивности в центре. Именно этот факт представляет интерес для приложений, в которых используются трубчатые пучки. «Вырезание» интенсивности вблизи оси распространения пучка может происходить несколькими способами (продробнее см. в разделе 1.3).

Как уже было определено, «вортекс» отличается от других пучков наличием ВД, при огибании которой значение фазы изменяется на число (порядок), кратное 2π. Под порядком в данном случае понимают скорость азитуального враще-

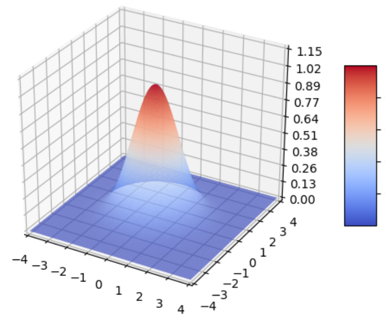

Рис. 1.1. Гауссовский пучок. Интенсивность нормирована на максимальное значение на оси

ния фазы, выраженного в виде целого числа. Математически порядок ВД можно вычислить, определив изменение фазы за полный обход по азимуту. При обходе ВД порядка l изменение фазы равно $\Delta\phi = 2\pi l$. В данной работе для изучения был выбран первый порядок дислокации, наиболее часто встречаемый в природе. Такие ВД получаются при распаде вихрей с большими порядками в результате сохранения топологического заряда.

Практическое применение вихревых пучков достаточно обширно. Их свойства позволяют эффективно применять «вортексы» в системах оптической связи, а также в различных метрологических устройствах. ВД были зафиксированы в ионосферных радиосигналах, а также в акустических сигналах, распространяющихся в океанических волноводах. [3]

1.2. Дифракция оптических вихрей

Среди разнообразных дифракционных явлений отдельного внимания заслуживает распространение оптических пучков, поперечные размеры которых велики по сравнению с длиной волны $a \gg \lambda$, где a - радиус пучка. Дифракция такого пучка развивается на расстояниях, определяемых дифракционной длиной пучка $l_{diff} \approx a^2/\lambda$. Если излучение имеет длину волны $\lambda = 800$ нм и поперечный радиус пучка $a = 1$ см, то $l_{diff} \approx 1,25$ км. В данной работе исследуется дифракция оптического вихря на расстояниях до 2 дифракционных длин.

Чтобы описать дифракцию волновых пучков, можно воспользоваться относительно простым интегральным методом Френеля, трактующим дифракционную картину как результат интерференции волн, идущих от вторичных точечных излучателей. [6]

На рис. 3.4 представлен оптический пучок с винтовой дислокацией в центре. Функция, задающая распределение амплитуды в стационарном вихре, имеет вид:

$$A(r, \phi, z = 0) = A_0(\frac{r}{r_0})^m \mathrm{exp}\{-\frac{r^2}{2r_0^2}\}\mathrm{exp}\{im\phi\},$$

где A_0 - амплитуда колебаний электрического поля в центре гауссовского пучка(из которого в дальнейшем будет образован вихрь), r - координата радиус-вектора до точки расчета, r_0 - радиус пучка, m - топологический заряд ВД.

1.3. Особенности численного моделирования

Численное моделирование формирования вихревого светового пучка сопряжено с большими вычислительными трудностями.

Основной проблемой является ресурсоемкость задачи. Генерация оптических пучков с ВД значительно затрудняет проведение расчетов, несмотря на простоту моделирования распространения вихрей, являющихся таковыми по умолчанию. После попадания в фазовый транспарант нулевая интенсивность на оси распространения пучка гауссовской моды формируется достаточно быстро. Это явление сопряжено с перераспределением энергии в поперечном сечении пучка. Образующиеся волны удаляются от центра и, отражаясь от границ сетки, интерферируют, создавая шумы и достаточно быстро разрушая образующийся вихрь. Подробнее данный процесс описан в разделе 3.1.

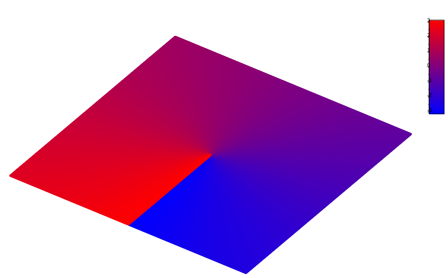

Рис. 1.2. Фазовая пластинка с дислокацией в центре, при обходе которой фаза изменяется от $-\pi$ (синий цвет) до π (красный цвет)

Одиними из вариантов решения проблемы ограниченности пространства являются: увеличение «буферной зоны» - т.е. отдаление границы сетки настолько, чтобы отраженные волны не вносили значительное искажение в центральной части пучка; «демпфирование» волн у границ сетки - подбор функции, способной значительно уменьшать амплитуды волн, доходящих до границ сетки; аподизация точечной дислокации, получаемая сглаживанием перепада от π до $-\pi$ (см. линию на границе цветов на рис. 1.2) при «навязывании» пучку фазы.

Тем не менее все способы имеют свои недостатки. В соответствии с предварительно проведенными вычислениями, для изучения распространения вихревого пучка на расстояния порядка одной дифракционной длины, расчетную сетку нужно увеличивать до колоссальных масштабов (отношение площадей сетки в поперечном рассмотрении и исходного гауссовского пучка велико и составляет 2^{16}). Опуская проведенные расчеты можно утверждать, что при задании пучка 2^{16} точками (что обеспечивает необходимое качество изображения), сетка, необходимая для такого расчета поместится лишь на 33 процессорах вычислительного кластера «Ломоносов». Несмотря на наличие таких ресурсов, избыточно масштабные вычисления будут производиться достаточно долго, а результат занимать немалую память. Особенно ярко данные проблемы выражены в исследовательских задачах, где рачетов с различными параметрами достаточно много, а временные ресурсы ограничены. Так, например, формирование оптического вихря, его распространение на 2 дифракционные длины на уменьшенной сетке ($2^{15} \times 2^{15}$) и вывод результатов расчета 1000 раз, реализованные последовательной программой, занимают около 7,5 часов работы процессора.

Подбор функции на границе сетки как отдельный способ «борьбы» с численными артефактами также имеет свои недостатки. Самыми главными являются сложность выбора сглаживающей зависимости и нестабильность решения. Проблема поиска функции, способной аккуратно сгладить различные волны на гранце сетки известна уже давно. Обычное «зануление» интенсивности в узлах, расположенных у границ сетки, не только не решает проблему, а, наоборот, ее усугубляет, уменьшая сетку. Несмотря на наличие данного затруднения, какого-либо общего алгоритма подбора сглаживающей функции нет. Его нахождение - непростая задача, которая требует отдельного исследования вне рамок настоящей работы.

Нестабильность сглаживающей функции, в свою очередь, проявляется уже при небольших изменениях параметров исходного пучка (длина волны, начальный радиус).

Наиболее перспективным представляется третий способ решения проблем с отражающимися волнами - сглаживание перепада в 2π в фазовой пластинке, так как именно эта зона в большей степени ответственна за формирование вторичных расходящихся волн.

Для более подробного изучения устройства фазовой пластинки обратимся к реализации эксперимента по формированию оптического вихря. Традиционно, требуемые распределения интенсивности получают путём применения сложных оптических элементов и схем, дифракционных оптических изделий. Получаемые с помощью данных методов формы фокальных пятен имеют высокое качество и минимальные потери интенсивности лазерного излучения. В лабораторных условиях получение пучка с ВД возможно несколькими способами, однако основными можно считать лишь два: поршневое зеркало, представляющее собой множество маленьких квадратных отражающих поверхностей, расположенных в параллельных плоскостях на расстояниях порядка долей микрометра, и гибкое деформируемое зеркало. Принцип работы в обоих случаях практически одинаковый: пучок определенной моды (например, гауссовской) падает на зеркало, создающее различную разность хода соседним лучам, вследствие чего происходит перераспределение интенсивности и образование новой моды (например, вихря). Вариации получающихся пучков во многом зависят от параметров и типа зеркала, а также от выбранной для него конфигурации.

Эксперименты, проведенные с различными типами зеркал, находят свое отражение во многих работах, связанных с перераспределением интенсивности в оптических пучках. Так в [5] рассмотрены способы моделирования кольцевого распределения интенсивности при помощи деформируемых зеркал биморфного типа. А в [2] представлены конструкция и принцип действия адаптивных зеркал.

Таким образом более плавное сглаживание разности фаз в рамках некоторых ограничений (например, в предложенных моделях) допустимо и может быть использовано при численном моделировании для уменьшения влияния отраженных от границ сетки волн. Именно этот способ, совместо с добавлением небольшой буферной зоны, предлагается использовать в данной работе для моделирования формирования вихревого пучка.

1.4. Цели работы

Цель данной работы состоит в численном исследовании особенностей формирования из гауссовского пучка кольцевого с вихревой фазовой дислокацией, а также изучение его распространения (дифракции). Работа включает рассмотрение трех задач:

· Формирование оптического вихря из пучка гауссовской моды с помощью фазовой пластинки.

· Исследование распространения пучка на расстояниях до нескольких дифракционных длин.

· Получение ускорения численного решения задач на суперкомпьютере «Ломоносов» при увеличении количества используемых узлов.

2. Содержание задачи

2.1. Математическая модель

Для написания программы, создающей и распространяющей отпический вихрь, необходимо переписать физическую модель в виде уравнений. Отталкиваясь от исходных данных (законы распространения(дифракции),подробно представленные в [7], и уравнение, задающее пучок гауссовской моды), а также знаний из университеткого курса оптики [1], можно вывести основные расчетные формулы.

Рассмотрим дифференциальное уравнение 2 порядка

$$2ik\frac{\partial|\vec{E}|}{\partial z} = \frac{\partial^2|\vec{E}|}{\partial x^2} + \frac{\partial^2|\vec{E}|}{\partial y^2} \tag{2.1}$$

с начальными условиями:

$$\begin{cases} |\vec{E}(z=0)| = |\vec{E}_0(x,y)| \\ |\vec{E}(x,y \to \pm\infty)| = 0, \end{cases}$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число, $\vec{E}$ - вектор напряженности. Начальные условия могут быть заданы следующим образом:

$$E_0(x,y) = E_0 A(x,y) B(x,y), \tag{2.2}$$

$$A(x,y) = e^{-\frac{x^2+y^2}{2a_0^2}}, B(x,y) = e^{i\varphi(x,y)},$$

где a_0 - радиус пучка, $\varphi(x,y)$ - некоторая функция. Здесь E_0 отвечает за амплитуду напряженности, $A(x,y)$ - за моду Гаусса (начальный пучок), а $B(x,y)$ - за «навязывание» фазы пучку при прохождении пластины. Для проведения расчетов перейдем к частотному представлению:

$$f(t) \doteqdot \hat{f}(\omega), \tag{2.3}$$

где $\hat{f}(\omega)$ - спектр функции. Выполним преобразования:

$$\hat{f}(\omega) = \int\limits_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{i\omega t}dt \tag{2.4}$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi}\int\limits_{-\infty}^{+\infty} \hat{f}(\omega)e^{-i\omega t}d\omega$$

$$f'(t) = \frac{1}{2\pi}\int\limits_{-\infty}^{+\infty} \hat{f}(\omega)e^{-i\omega t}(-i\omega)d\omega$$

Таким образом получаем, что:

$$f'(t) \doteqdot -i\omega\hat{f}(\omega) \tag{2.5}$$

Теперь, используя преобразование Фурье, мы можем совершить переход:

$$E(x, y, z) \longleftrightarrow \hat{E}(k_x, k_y, z) \tag{2.6}$$

$$E(x, y, z) = \int\limits_{-\infty}^{+\infty}\int\limits_{-\infty}^{+\infty} \hat{E}(k_x, k_y, z)e^{-ik_x x}e^{-ik_y y}dk_x dk_y$$

Теперь подставим данное $E(x, y, z)$ в исходное волновое уравнение (2.1) :

$$2ik\int\limits_{-\infty}^{+\infty}\int\limits_{-\infty}^{+\infty} \hat{E}_z(k_x, k_y, z)e^{-ik_x x}e^{-ik_y y}dk_x dk_y =$$

$$= \int\limits_{-\infty}^{+\infty}\int\limits_{-\infty}^{+\infty} \hat{E}(k_x, k_y, z)e^{-ik_x x}e^{-ik_y y}(-ik_x)^2 dk_x dk_y +$$

$$+ \int\limits_{-\infty}^{+\infty}\int\limits_{-\infty}^{+\infty} \hat{E}(k_x, k_y, z)e^{-ik_x x}e^{-ik_y y}(-ik_y)^2 dk_x dk_y$$

$$2ik\hat{E}_z(k_x, k_y, z) = \hat{E}(k_x, k_y, z)[(ik_x)^2 + (ik_y)^2]$$

$$2ik\hat{E}_z(k_x, k_y, z) = \hat{E}(k_x, k_y, z)[-k_x^2 - k_y^2]$$

$$\hat{E}_z(k_x, k_y, z) = i\frac{k_x^2 + k_y^2}{2k}\hat{E}(k_x, k_y, z)$$

Теперь получаем следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{d\hat{E}}{dz} = i\frac{k_x^2 + k_y^2}{2k}\hat{E} \tag{2.7}$$

Его решение имеет вид:

$$\hat{E}(z) = \hat{E}_0 e^{i\frac{k_x^2 + k_y^2}{2k}z}. \tag{2.8}$$

Тогда схема проведения численного расчета будет выглядеть следующим образом:

$$E_0(x, y) \xrightarrow{FFT} \hat{E}_0(k_x, k_y) \xrightarrow{\cdot e^{i\frac{k_x^2 + k_y^2}{2k}z}} \hat{E}(k_x, k_y, z) \xrightarrow{FFT^{-1}} E(x, y, z)$$

2.2. Выбор параллельного алгоритма и оптимизация работы программы

Ввиду большой ресурсоемкости расчетов, для решения задач численного моделирования формирования оптического вихря из гауссовского пучка и изучение его дальнейшего распространения, требуется создание параллельной программы и ее дальнейшее использование на суперкомпьютерах.

При разработке параллельной программы необходимо было решить следующие задачи: разбить сетку, а также выбрать ее оптимальные масштабы, использовать быстрое преобразование Фурье (БПФ) для параллельных расчетов, а также выполнить оптимизацию работы программы с целью получения минимального времени ее работы.

Для реализации параллельной программы используется интерфейс MPI, подходящий для использования на вычислительных кластерах с массивно-параллельной архитектурой (MPP). Главная особенность такой архитектуры состоит в том, что память физически разделена. В этом случае система строится из отдельных модулей, содержащих процессор, локальный банк операционной памяти (ОП), а также некоторые другие элементы. Доступ к банку ОП из данного модуля имеют только процессоры (ЦП) из этого же модуля. Именно эта особенность и порождает необходимость в разделении сетки по узлам кластера, которая в данной программе представляет из себя блоки одинаковой ширины, равномерно распределенные между несколькими процессами.

Для исследования дифракции оптического пучка необходимо неоднократно осуществлять преобразование Фурье. С этой целью в программе используются средства библиотеки «FFTW-3», написанной на языке C. Данная реализация БПФ допускает свое применение на системах с MPP-архитектурой.

Большинство расчетов проводилось при масштабах сетки $2^{13} \times 2^{13}$ узлов, в то время, как сам вихрь, после прохождения 2 дифракционных длин, поместился на $2^8 \times 2^8$ узлах. Степень «двойки» в масштабах сетки выбрана неслучайно: согласно документации библиотеки «FFTW-3», в случае, если число узлов на стороне квадратной сетки кратно 2, будет использоваться наиболле оптимизированный алгоритм. Также использовние данной библиотеки создает острую необходимость в использовании пользовательского типа данных «fftw_complex», являющегося реализацией complex<double> из стандартной библиотеки языка C++ <complex> в виде массива из двух элементов: действительной и мнимой частей. Использование комплексных чисел, реализованных в стандартной библиотеке языка C++, нецелесообразно ввиду необходимости применения в таком случае достаточно большого количества операций преобразования типа (что, в свою очередь, будет занимать лишнее время). Даже без дополнительного эксперимента можно сделать заключение о том, что операция приведения к другому типу некоторого массива, реализованная не менее 200 раз, в программах на C++ создает дополнительные трудности, а также затраты ресурсов. Тем не менее на некоторых участках программы использование reinterpret_cast<fftw_complex> для преобразования типа комплексных чисел необходимо ввиду того, что при работе с пользовательским типом данных накладываются некоторые ограничения на использование функциональных способностей языка программирования. В противном случае временная сложность дополнительных операций, по оценкам, добавит порядка $O(N^2)$, где N - количество узлов сетки.

Дополнительная экономия ресурсов памяти была получена благодаря возможности проведения in-place дискретного преобразования Фурье, т.е. запись результатов проводилась в массив с исходными данными. В таком случае на каждом процессоре выделялась небольшая буферная зона памяти для работы с участком расчетной сетки.

Все представленные в работе графики были созданы с использованием программ, написанных на языке программирования Python или при помощи программного обеспечения QtiPlot.

3. Результаты работы

3.1. Формирование вихревого пучка и его распространение

Вначале был проведен эксперимент, в котором из пучка гауссовской моды был получен оптический вихрь.

На рис. 3.1 представлен полученный световой пучок сразу за фазовым экраном на расстоянии $z = 0.01$ дифракционной длины. Можно заметить, что нуль на оси пучка уже сформировался. Для более подробного анализа того, как это происходило, были получены результаты с уменьшенным шагом по оси z (0,00001 дифракционной длины)

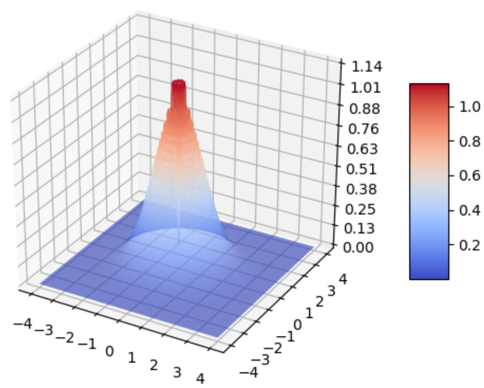

Рис. 3.1. Гауссовский пучок после прохождения фазовой пластинки

Отдельно следует рассмотреть формирование нулевой интенсивности в центре оптического вихря, для этого процесс его образования был разделен на 1000 интервалов, для каждого из которых был проведен численный расчет состояния вихря. В первые моменты времени возникает всплеск интенсивности в окрестности центра пучка. При рассмотрении гауссовского пучка с единичной максимальной интенсивностью, всплеск доходит до значений 1.13 - 1.14. Далее этот выброс энергии приводит к формированию расходящихся волн. «Вырезание» энергии из центра происходит потепеннно, с небольшой задержкой при подходе к половине начальной интенсивности на оси пучка. При прохождении 7,2% от расстояния, необходимого для формирования ВД, внешний вид пучка, проходящего фазовую пластинку, изображен на рис. 3.2.

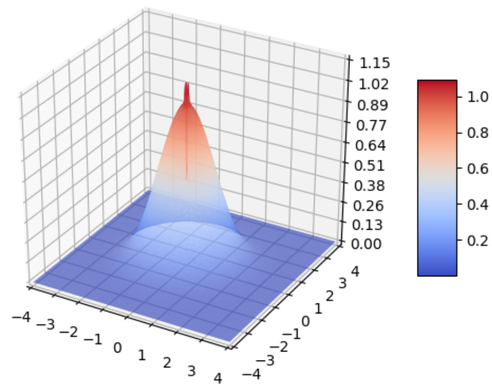

Рис. 3.2. Распределение интенсивности в пучке на расстоянии 0,00072 $z_{\text{дифр}}$ за фазовой пластинкой

В качестве дополнительной задачи был поставлен вопрос сравнительной характеристики основных параметров при дифракции оптического вихря и пучка гауссовской моды. Основываясь на результатах серии численных экспериментов, было установлено, что нормированная на начальную максимальная интенсивность пучка, при различном пройденном расстоянии, не зависит от выбранного пучка. График, визуализирующий данное утверждение представлен на рис. 3.3.

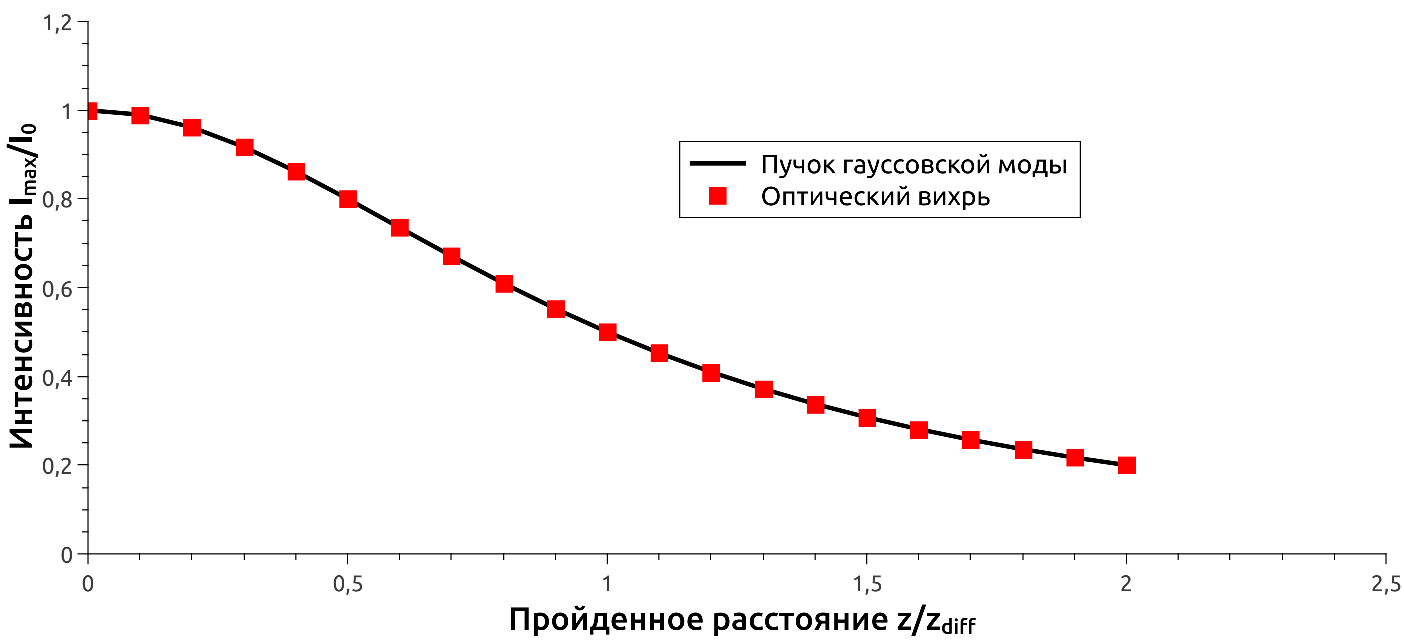

Рис. 3.3. Зависимость нормированной максимальной интенсивности в зависимости от расстояния, пройденного оптическим вихрем / пучком гауссовской моды

Также в работе была исследована дифракция оптического вихря. Результаты проведенного численного эксперимента представлены на рис. 3.4. Искажения от теоретической зависимости при прохождении двух дифракционных длин (артефакты) обусловлены наличием возращающихся отраженных от границ стенки волн, которые вносят искажения в проведение численного эксперимента.

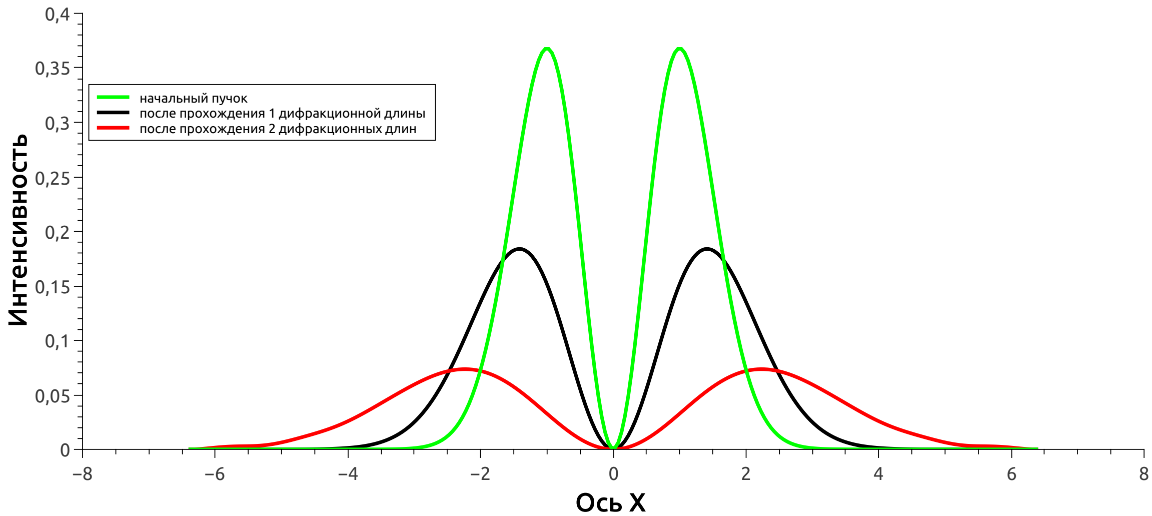

Рис. 3.4. Оптический вихрь изначально и после прохождения 1 и 2 дифракционных длин

3.2. Оценка эффективности параллельного алгоритма

Ввиду того, что при решении задач численного моделирования исользовался параллельный алгоритм, представляет интерес оценка эффективности его использования.

Основные причины, создавшие необходимость написания пареллельной программы, - это большие масштабы вычислительной сетки, а также достаточно длительный расчет (в цифрах оценка данных величин представлена в пункте 1.3). В результате распараллеливания вычислений (большую часть которых занимает неоднократное дискретное преобразование Фурье) удалось уменьшить размеры памяти, затрачиваемые на каждом узле кластера (процессоре) для проведения вычислений и, как результат, получить сокращение времени работы программы.

На рис. 3.5 представлен график зависимости времени работы программы от числа процессов. Для наглядности точки на сетке соединены прямыми линиями. Расчет проводился до 64 процессов, так как этого числа узлов хватает для оценки времени работы программы. Для каждого числа процессов программа была запущена 3 раза, а время было взято в качестве среднего арифметического независимо измеренных величин.

Рис. 3.5. График зависимости времени работы программы от числа запущенных процессов

Расчет времени начинался в момент попадания гауссовского пучка на плоскоть фазовой пластинки. Считая пластинку достаточно тонкой, начало распространения оптического вихря (координата $z = 0$) находится тут же. Окончание измерения времени происходило по прошествии вортексом расстояния 2 дифракционных длин ($z = 2z_{diff}$). Таким образом время, представленное на графике, необходимо для образования вихря, а также его последующего распространения на расстоянение 2 дифракционных длин.

Основной оценкой качества распараллеливания программы можно считать ускорение ее работы в зависимости от числа запущенных процессов (для систем с MPP архитектурой). Вычисление данной характеристики производится с использованием закона Амдала, который в общем случае имеет вид:

$$R = \frac{W \cdot t}{(W_{\text{ск}} + \frac{W_{\text{пр}}}{n}) \cdot t} = \frac{1}{a + \frac{1-a}{n}} \xrightarrow{n \to \infty} \frac{1}{a}, \tag{3.1}$$

где R - ускорение параллельной системы, $W = W_{\text{ск}} + W_{\text{пр}}$ - общее число операций в задаче, равное сумме скалярных(нераспараллеливаемых), а также тех, которые можно выполнять параллельно, t - время выполнения одной операции, n - число процессов в системе, а $a = W_{\text{ск}}/W$ - удельный вес скалярных операций.

Полагая, что программа не содержит скалярных операций, а параллельная часть равномерно разделена между n процессами, можно записать закон Амдала в упрощенном виде:

$$R = \frac{T_1}{T_n}. \tag{3.2}$$

Здесь T_1 - время решения задачи на однопроцессорной системе, а T_n - время решения такой же задачи на n-процессорной системе.

Так как в программе, моделирующей создание и распространение оптического вихря, измерение времени происходит только для полностью параллельного участка, где процессоры имеют одинаковую нагрузку, для расчета ускорения справедливо использование формулы 3.2. Полученные результаты представлены на рис. 3.6.

Рис. 3.6. График зависимости ускорения работы программы от числа запущенных процессов

На рис. 3.7 представлены численные результаты измеренного времени (в секундах), а также ускорения работы программы.

Количество процессов	Время работы программы	Ускорение работы
1	194,4	1,00
2	108,7	1,79
4	64,0	3,04
8	29,3	6,63
16	13,5	14,40
32	7,9	24,61
64	6,6	29,45

Рис. 3.7. Таблица с результатами измерений, проведенных на суперкомпьютере «Ломоносов» МГУ

Заключение

В данной работе было проведено численное моделирование формирования кольцевого оптического пучка с винтовой дислокацией фазы на оси, возникающей при прохождении света через фазовую пластинку. Исследованы особенности распространения (дифракции) такого пучка, проведен сравнительный анализ различных параметров оптического вихря в сравнении с пучком гауссовской моды. Результатом разработанной программы является наглядная демонстрация процесса формирования оптического вихря из гауссовского пучка и физическая картина его дифракции.

Ввиду большой ресурсоемкости задачи численные расчеты проводились с использованием методов параллельного программирования на кластере физического факультета, а также суперкомпьютере «Ломоносов» МГУ. Для решения проблем моделирования формирования пучка с винтовой дислокацией фазы был проведен анализ и оценка эффективности различных алгоритмов, применяемых на практике специалистами в области вычислительного эксперимента. Показано, что наибольшая эффективность параллельной программы достигается при создании 16 процессов, а наименее время работы было достигнуто при максимальном числе используемых процессов, которое в работе составило 64.

Благодарности

Благодарю Святослава Александровича Шленова за активное научное руководство и помощь в написании курсовой работы, за помощь в изучении оптических вихрей, а также техник простейших вычислительных экспериментов в задачах оптики.

Выражаю особую благодарнсть Александру Александровичу Дергачеву за помощь в создании программы для проведения вычислительного эксперимента, за замечательный курс «Программирование и информатика», благодаря которому мне удалось получить минимально необходимые навыки для проведения вычислительного эксперимента, а также за помощь в выборе специализации.

Благодарю Елену Александровну Никанорову за семинары по курсам общей физики, которые позволили получить базовые знания для написания данной работы.

Благодарю Владимира Олеговича Милицина, Ивана Андреевича Буткарева, Дениса Николаевича Янышева за курс «Параллельное программирование», успешное освоение которого позволило решать ресурсоемкие задачи физики, а также создавать оптимизированные по времени работы и ресурсам памяти программы.

Список литературы

1. Ахманов С. А., Никитин С. Ю. Физическая оптика. М.: Издательство Московского университета, 2004.
2. Воронцов М. А., Кудряшов А. В., Назаркин С. И., Шмальгаузен В. И.. Гибкое зеркало для адаптивных систем формирования световых пучков // Квантовая электроника, 1984.- том 11.- №6.- С. 1247–1249.
3. Короленко П. В. Оптические вихри. // Соросовский образовательный журнал, 1998.- №6.- С. 94-99.
4. Котляр В. В., Ковалев А. А. Оптические вихри. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2019.- С.
5. Лылова А. Н., Шелдакова Ю. В., Кудряшов А. В., Самаркин В. В. Формирование кольцевого и супергауссова распределений интенсивности лазерного излучения в дальней зоне с использованием биморфного зеркала // Квантовая электроника, 2018.- том 48.- №1.- С. 57–61.
6. Сухоруков А. П.. Дифракция световых пучков в нелинейных средах // Соросовский образовательный журнал, 1996.- №5.- С. 85-92.
7. Gabriel M., Grange J.. Comprendre et appliquer l'optique. 2 - optique ondulatoire. P: Masson, 1990.- Pp. 31-44.
8. Smith Arlee V., Armstrong Darrell J. Generation of vortex beams by an image-rotating optical parametric oscillator // OPTICS EXPRESS. — 2003. — Vol. 11, no. 8. — Pp. 868–873.