Научная статья

УДК 681,787;517,443;519,6 DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-111-118

Преобразование Фурье на практикуме по физической оптике в Новосибирском государственном университете

Спартак Евгеньевич Краснопевцев

Новосибирский государственный университет Новосибирск, Россия

k.s.e@nsu.ru

Аннотация

Описана разработка программы на языке Python для анализа изображений интерференций и формирования графика спектра источника света для практикума по физической оптике. Предусмотрена калибровка преобразования Фурье и определение частотных составляющих в составе света. Строится график видности, оценивается ширина видности.

Ключевые слова

интерференция, преобразование Фурье, спектральный состав света, видность, длина когерентности

Для цитирования

Краснопевцев С. Е. Преобразование Фурье на практикуме по физической оптике в Новосибирском государственном университете // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 2. С. 111–118. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-111-118

Fourier Transform at the Workshop on Physical Optics of NSU

Spartak E. Krasnopevtsev

Novosibirsk State University Novosibirsk, Russian Federation

k.s.e@nsu.ru

Annotation

Description of the development of a program in Python for analyzing interference images and generating a graph of the spectrum of a light source for a workshop on physical optics. Calibration of the Fourier transform and determination of frequency components in the composition of light are provided. A visibility graph is constructed and the visibility width is estimated.

Keywords

Interference, Fourier transform, spectral composition of light, visibility, coherence length

For citation

Krasnopevtsev S. E. Fourier transform at the workshop on physical optics of NSU. Siberian Journal of Physics, 2024, vol. 19, no. 2, pp. 111–118 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-111-118

© Краснопевцев С. Е., 2024

Введение

В структуре учебного процесса физического факультета Новосибирского государственного университета (НГУ) преобладает теоретическая форма обучения над практической формой. Поэтому занятия на лабораторных практикумах являются своего рода противовесом, развивающим у студентов необходимые навыки практической работы и лабораторных исследований.

Современные физические исследования представляют собой не только работу с научными приборами и экспериментальным оборудованием, но и автоматизацию эксперимента, цифровую обработку данных, анализ и представление информации. Следовательно, эту цифровую, информационную специфику необходимо так же учитывать и внедрять ее в организацию учебного процесса лабораторных практикумов.

1. Постановка задачи

На практикуме по физической оптике для студентов второго курса физического факультета НГУ возникла необходимость разработки программы анализа изображения интерференционных картин, которая позволила бы получить спектральный состав источника света.

На практикуме имеется оптическая лабораторная установка для изучения интерференции света, которая предусматривает получение интерференционной картины тремя способами. Первый способ реализует опыт Юнга с интерференцией от двух щелей. Второй использует бипризму Френеля, где пересекаются пучки, преломленные на двух плечах этой призмы. Третий реализует интерферометр Майкельсона, где два пучка, полученные на светоделительном кубе, отразившись от двух зеркал, вновь сходятся после того же светоделительного куба, пересекаясь под небольшим углом. В результате формируются три типа интерференционных картин, которые фиксируются видеокамерой, передающей изображение на компьютер, где его можно сохранить в файл.

Целью лабораторной работы является ознакомление с интерференцией света и определение длины волны нескольких источников света, которые подаются для формирования интерференционных картин. Один из трех источников света имеет известную длину волны.

Оптическая схема установки позволяет смешивать пучки всех трех источников в один пучок. Эти источники включаются в любых комбинациях тремя переключателями.

2. Реализация программы

Программа реализована на языке Python, который обретает необычайную популярность в научной среде. Язык развивается сообществом энтузиастов, имеет открытый исходный код и распространяется бесплатно. Язык легок в освоении и прост в использовании, обладает высокой гибкостью и элегантностью. Сравнение Python с популярными языками типа C++, показывает, что Python в разы повышает производительность труда программиста. Число символов в типичной программе на Python составляет около 20–35 % от программного кода на языке C++ или Java для аналогичной программы. А это и сокращенное в 3–5 раз время на отладку программы.

Популярность языка Python связана с тем, что для него существует большое количество свободно распространяемых и легко устанавливаемых программных библиотек, позволяющих существенно расширить возможности программ. Язык Python является одним из двух языков, предлагаемых для изучения студентам второго курса физического факультета НГУ по дисциплине «Программирование».

Программа реализована на основе библиотеки пользовательского интерфейса PySide6, имеющую открытую лицензию. Кроме этого, для получения спектра необходимы свободно распространяемые программные модули: numpy, scipy, cv2 и PyQtGraph. Модуль numpy предоставляет набор функций для работы с массивами (в терминах языка Python они называют-

ся списками). Модуль scipy предоставляет набор математических функций, в том числе связанных с преобразованием Фурье. Модуль сv2 представляет собой набор классов библиотеки OpenCV версии 2.0, которая содержит набор функций для работы с изображениями. Модуль PyQtGraph используется для вывода изображений на экран.

Ниже (рис. 1) приводится фрагмент программы, отвечающий за получение массивов, необходимых для отображения спектра в виде графика на экране. Символ решетки «#» обозначает начало комментария. Комментарии не выполняются и служат лишь для добавления пояснений.

```
amplitude_data = [] # Массив значений профиля интенсивности (амплитуды) интерференционной
         # картины, полученный ранее. Он должен быть заполнен данными амплитуды.
                  # Логическая переменная, определяющая форму представления спектра
wavelength = True
ColorSpectrNM = QColor(255,235,0) # Цвет линии (в формате RGB) графика спектра в длинах волн
ColorSpectrTHz = QColor(0,235,255) # Цвет линии (в формате RGB) графика спектра в частотах
# Производим дискретное преобразование Фурье
yf = scipy.fft.rfft(amplitude_data)
# Производим сдвиг компонент нулевой частоты в центр спектра
y = scipy.fft.fftshift(yf)
# Получим массив (шкалу) частот дискретного преобразования Фурье
time step = 1/n # где n - параметр, определяющий масштабирование спектра (для его калибровки)
x = scipy.fft.fftfreq( yf.size, time step )
# Сократить полученный массив спектра вдвое, т.к. это две симметричные кривые,
# относительно нулевой частоты
half_n = math.trunc( y.size / 2 ) # Получим размер половины размера массива с
#
                                    округлением до меньшего целого значения
# Получим новый массив значений нижней оси в длинах волн (нм) вместо частот (ТГц)
xl = 300000 * np.reciprocal(x, where= x!=0) # Взять обратное значение всех элементов массива
# Подготовим массивы вещественных значений х и у из их комплексных значений
                            # Массив значений оси (шкалы) Х для спектра частот
gxf = np.abs(x[1:half_n])
gxl = np.abs(xl[1:half_n])
                                      # Массив значений оси (шкалы) Х для спектра длин волн
gy = np.abs(y[half_n+1:half_n+half_n]) # Массив значений высот спектра
# Подготовка объекта графического поля для отображения спектра
gwin = pg.GraphicsLayoutWidget() # Создаем объект класса библиотеки PyQtGraphics
p3 = gwin.addPlot(title="Спектр") # Создает объект класса PlotItem (линия графика спектра)
d3 = p3.plot(enableMouse=False) # Получаем объект класса ViewBox
# Вывод графика спектра (в зависимости от режима представления, в длинах волн или в частотах)
if wavelength == True: # Если режим представления спектра в нанометрах
   d3.setData( gxl, gy, pen=ColorSpectrNM ) # Отображение графика спектра
else:
                       # Если режим представления спектра в терагерцах
   d3.setData( gxf, gy, pen=ColorSpectrTHz ) # Отображение графика спектра
```

Рис. 1. Выдержка из программы, реализующая преобразования Фурье и выводящая результат в объект изображения

Fig. 1. Excerpt from a program that implements the Fourier transform and outputs the result to an image object

Пользовательский интерфейс программы построен в виде последовательно следующих друг за другом горизонтальных графических элементов (окон), в которых отображаются графики по мере обработки и преобразования исходных данных (рис. 2). Таких окон три:

– окно исходного изображения;

- окно поперечного профиля интенсивности интерференционной картины;

- окно спектрального представления.

Границы между всеми окнами перемещаются при помощи манипулятора «мышь» (далее – мышь). Это позволяет заострить внимание на любом интересующем изображении, увеличив его на весь размер окна программы.



Puc. 2. Общий вид окна программы *Fig. 2.* General view of the program window

Окно исходного изображения представляет исследуемое изображение. Поверх него отображается рамка. Это инструмент выборки интересующего фрагмента изображения. В терминах программы этот инструмент именуется «областью интереса». Его можно перемещать по изображению, изменять отдельно ширину и высоту. Если ширина определяет длину строки данных для последующего анализа, то высота определяет границы усреднения строк данных изображения. По мере эксплуатации программы стало ясно, что не все исследуемые изображения интерференционных картин имеют полосы, строго выровненные по вертикали. А если это так, то усреднение таких наборов строк с косыми полосами приводит к размытию и снижению видности (контраста по Майкельсону) итогового профиля интенсивности интерференционных полос. Поэтому добавлена возможность изменения угла поворота области интереса. При этом выборка строк данных и их усреднение так же производится под заданным углом. Само изображение интерференционной картины также можно перемещать и масштабировать мышью, синхронно с областью интереса. Это позволяет более тщательно рассмотреть детали изображения и точнее задать форму и положение рамки области интереса.

Окно поперечного профиля интенсивности интерференционной картины (рис. 3) позволяет студенту осмыслить, какую информацию мы извлекаем из изображения для дальнейшего получения из него спектральной характеристики источника света. По виду этого графика замечено, что наклон интерференционных полос влияет на амплитуду изменения профиля интенсивности.



Рис. 3. Кривая профиля интенсивности (зеленая линия) и кривая видности (черная линия) *Fig. 3.* Intensity profile curve (green line) and visibility curve (black line)

Учитывая важность точной подгонки угла поворота области интереса, добавлен новый элемент – график величины видности по всей длине выбранных данных. По наибольшей высоте его вершины можно численно определить пик видности и, соответственно, оптимальный угол поворота области интереса. Для светодиодных одноцветных источников света этот график имеет форму, похожую на «колокол» с выраженным максимумом max. Точки пересечения графика с уровнем max/*e* принято определять как границы видности. Для лазерных источников этот график представляет слегка искривленную прямую по всей протяженности графика. Это говорит о том, что длина когерентности источников этих типов существенно различается. По ширине границ видности можно оценить длину когерентности источника света. Это еще одна характеристика источника, определяемая представленной программой, которую можно получить в данной лабораторной работе. Определение видности производится по классической формуле:

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}},$$

где I_{\min} и I_{\max} – значения локальных экстремумов на графике профиля интенсивности интерференционных полос.

Для визуализации ширины области контраста добавлены две подвижные вертикальные риски, находящиеся в точках пересечения кривой видности с уровнем, равным max/*e*, где max – уровень максимальной высоты кривой видности, а *e* – основание натурального логарифма.

Завершающим элементом анализа является преобразование Фурье, исходными данными для которого является профиль интенсивности интерференционной картины. В результате дискретного преобразования Фурье мы получаем данные, на основании которого строится соответствующий график.

Кроме этого, в некоторых случаях удобно ограничить отображение спектра границами видимого диапазона. Для этого на панели инструментов и в меню программы имеются соответствующие опции.

3. Калибровка и определение частот

Чтобы по полученному спектру можно было определить частоты его компонент, необходимо произвести калибровку. Для этого необходимо снять изображение интерференционной картины, полученной от одного источника монохроматического света известной длины волны. Загрузив это изображение и получив график спектра, мы увидим на нем одиночный пик. Далее необходимо включить режим калибровки. На графике спектра появится яркая риска с текстовой меткой, отображающей текущую длину волны в данной точке графика, а на панели инструментов станут доступны два регулятора (спин-бокса). Один из них позволяет задать длину волны используемого источника света. Во время подстройки этой величины риска на графике спектра будет перемещаться. Второй регулятор позволяет перемещать график спектра вправо или влево. Нужно переместить график спектра таким образом, чтобы точно совместить вершину спектрального пика с риской калибровочной длины волны (рис. 4).



Puc. 4. Завершение калибровки *Fig. 4.* Completing calibration

После завершения калибровки мы можем определять частоту или длину волны любого элемента спектра, просто перемещая курсор мыши по окну спектра. Риска, сопровождающая курсор мыши над областью спектра, снабжена числовой меткой, отображающей длину волны или частоту в зависимости от режима отображения спектра.



Puc. 5. Определение частот спектральных пиков *Fig. 5.* Determination of spectral peak frequencies

Если теперь загрузить в программу изображение интерференционной картины, полученной от других источников света или их комбинации, мы сможем определить частоты этих источников и даже оценить их относительную интенсивность. Для этого необходимо перемещать курсор мыши над окном отображения спектра. Вслед за курсором будет перемещаться риска с подписью, указывающей значение текущей длины волны в данной точке спектра (рис. 5).

Во время исследований важно сохранять единые условия снятия интерференционных картин при подготовке новых изображений интерференции.

Программа позволяет подключать современные камеры высокого разрешения, чтобы исследовать интерференционное изображение в реальном времени. Для получения ответов на возникающие вопросы предусмотрена подробная справка с иллюстрациями, доступная в меню и по нажатию клавиши «F1».

4. Выводы

Представленная программа отличается от существующих программ прежде всего простотой управления, легким получением результатов и отсутствием лишнего. Она не имеет сложных и невостребованных в учебном процессе функций, которые свойственны профессиональным программам.



Puc. 6. Определение диаметра интерференционных колец *Fig. 6.* Determining the diameter of interference rings

В программу включены дополнительные инструменты, позволяющие использовать ее и в других работах для экранных измерений, например, шага полос, диаметров колец и т. п. (рис. 6).

Сведения об авторе

Краснопевцев Спартак Евгеньевич, старший преподаватель

Information about the Author

Spartak E. Krasnopevtsev, Senior Lecturer

Статья поступила в редакцию 31.01.2024; одобрена после рецензирования 07.02.2024; принята к публикации 17.02.2024 The article was submitted 31.01.2024; approved after reviewing 07.02.2024; accepted for publication 17.02.2024