ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ И ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ЗАРЯДА ОПТИЧЕСКОГО ВИХРЯ

Ф.Ю. Канев[1], В.П. Аксенов[1], Н.А. Макенова[1], Ф.А. Стариков[2], И.Д. Веретехин[3]

[1]Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск

[2]Российский федеральный ядерный центр, Саров

[3]Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск

e-mail: kanev@iao.ru, mna@iao.ru, aksenov@iao.ru

Ключевые слова: оптический вихрь, интерференция, топологический заряд

В докладе приводится алгоритм определения характеристик оптического вихря по ветвлению полос интерференционной картины и описывается компьютерная программа, построенная на его основе. В качестве входных данных программы используется изображение, записанное в файле типа BMP, в результате ее работы генерируется информация о топологическом заряде вихря и его положении. Точность работы алгоритма проверена в условиях, когда визуальное определение ветвления полос является затруднительным. Также в докладе показано, что алгоритм обладает не меньшей точностью, чем известные аналоги, тогда как с его использованием может быть получен больший объем информации.

Оптический вихрь проявляет себя как изолированный минимум в поперечном распределении интенсивности некоторых типов лазеров, в спекл-картине рассеянного шероховатой поверхностью или преломленного турбулентной атмосферой лазерного излучения [1,3]. Каждой такой точке может быть сопоставлен топологический заряд, который представляет собой число (положительное или отрицательное), равное 2π [1]. Эта величина возникает как результат суммирования градиента фазы вдоль замкнутого контура, окружающего область с минимальной интенсивностью. Изучение оптических вихрей стало предметом сформировавшегося в последние десятилетия направления в оптике, названного сингулярной оптикой [1÷4]. Еще одним проявлением оптического вихря является ветвление полос интерференционной картины, полученной для пучка, имеющего сингулярность в волновом фронте. Одной из задач вихревой оптики, представляющей научный и практический интерес, является определение наличия особой точки в пучке и регистрация ее координат.

Для определения точек ветвления полос интерференционной картины был разработан специальный алгоритм и написана компьютерная программа на языке C++. Последовательность действий выполняемых алгоритмом описывается ниже:

1-я операция. Считывание изображения из файла ИмяФайла.BMP, оцифровка изображения. В результате в оперативной памяти компьютера файл записывается как массив чисел, изменяющихся в диапазоне от 0 до 256.

2-я операция. Фильтрация (сглаживание) изображения, определение минимумов и максимумов. Для подавления шумов использовался простой интегральный фильтр, работа которого может быть описана уравнением вида

$$f_{res}(x) = \frac{\int_{x-\Delta x}^{x+\Delta x} f(x)dx}{2\Delta x}. \qquad (1)$$

Здесь $f_{res}(x)$ – функция, полученная в результате фильтрации, $f(x)$ – оригинал функции, $2\Delta x$ – величина интервала, в котором выполняется интегрирование, это параметр, задаваемый в программе. При численном моделировании вместо интегрирования вводится суммирование, и фильтрация выполняется в каждом из сечений интерференционной картины.

3-я операция. Формирование интерференционных полос. При выполнении этой операции все точки максимумов и минимумов, расположенные определенным образом относительно друг друга, объединяются в полосы, для чего применяется специальный алгоритм, анализирующий их относительное положение. В результате получаются интегральные, состоящие из многих точек объекты. Здесь же находятся начала и окончания интерференционных полос.

4-я операция. Нахождение ветвления полос. После получения линий максимумов и минимумов необходимым является выполнение следующей процедуры – определение структуры, характерной для ветвящейся полосы, т.е. нахождение линии основного максимума и «ветвей», линий максимумов и минимумов, начинающихся ниже, чем начало основной линии и находящихся к этой линии ближе, чем линии других экстремумов. Указанная структура должна быть ограничена линиями минимумов.

5-я операция. Нахождение положения и топологического заряда оптического вихря. На этом этапе подсчитывается число «ветвей», определяется их расположение относительно основного максимума (направлены вверх или вниз) и по координатам точек их начала определяется положение дислокации. Результат обработки интерферограммы показан на рисунке 1, где в центре отмечена особая точка.

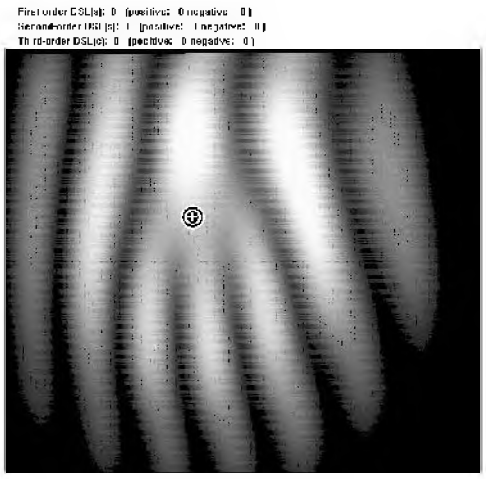
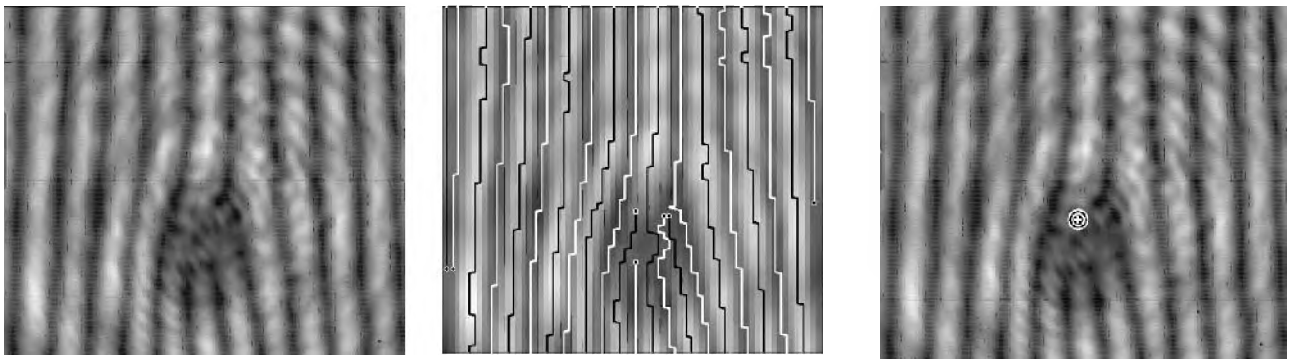


Рисунок 1 - Найденная точка ветвления полос интерференционной картины и характеристики соответствующего оптического вихря. Изменить рисунок, показать ветвящуюся полосу и найденную особую точку

Алгоритм также выводит на экран информацию о результатах своей работы, отмечая число найденных вихрей, их заряд и ориентацию. На рисунке 1 найден один вихрь второго порядка положительной ориентации (топологический заряд +2).

В тоже время применение численного эксперимента возможно для анализа любого изображения, записанного в файле с расширением .BMP, что позволяет использовать его для обработки экспериментальных данных. В качестве примера будем использовать интерференционную картину, полученную группой Старикова Ф.А. (рисунок 2 (а)).



(а) (б) (в)

Рисунок 2 - Обработка экспериментальных результатов, предоставленных Ф.А. Стариковым. Оригинальное изображение (а), полосы минимумов и максимумов (б) и найденная особая точка (в)

Здесь видно, что вихрь присутствует в центре рисунка, но наличие значительных искажений затрудняет достоверное определение его характеристик, поэтому данный пример является своеобразным тестом применения алгоритма в условиях, когда шум накладывается на функцию, формирующую изображение. Полосы максимумов и минимумов, соответствующие интерферограмме, приводятся на рисунке 2 (б). Несмотря на искажения, ветвление здесь хорошо прослеживается, оно без труда находится алгоритмом, а в результате последовательного выполнения операций в центре регистрируется особая точка второго (рисунке 2 (в)).

Мы также проверили возможность использования нашего алгоритма в условиях приближенных к заданным авторами [4] условиям. В результате при умеренных искажениях были найдены все шесть особых точек и правильно зарегистрирован их топологический заряд. При увеличении интенсивности искажений было определено положение пяти вихрей из шести, их заряды определялись без ошибок. Таким образом, точность двух рассмотренных здесь алгоритмов приблизительно одинаково уменьшается с увеличением искажений интерференционной картины, но разработанный нами алгоритм позволяет получить больший объем информации.

Литература

1. Аксенов В.П., Дудоров В.В., Колосов В.В., Филимонов Г.А. Формирование вихревых лазерных пучков с нулевым орбитальным моментом и ненулевым топологическим зарядом // Оптика атмосферы и океана. 2017. Т. 30, № 11. С. 905 – 909.

2. Passos M.H.M., Lemos M.R., Almeida S.R., Balthazar W.F., Da Silva L., Huguenin A.O. Speckle patterns produced by an optical vortex and its application to surface roughness measurements // Applied Optics. 2017. V. 56, № 2. P. 330 – 335.

3. Popiołek-Masajada A., Masajada J., Kurzynowski P. Analytical model of the optical vortex scanning microscope with a simple phase object // Photonics. 2017. V. 4, № 38. P. 1 – 14.

4. Patorski K. and Pokorski K. Examination of singular scalar light fields using wavelet processing of fork fringes // Applied Optics. 2011. V. 50, № 5. P. 773 – 781.