

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФРАКЦИИ НА КОНТУРНОЙ АПЕРТУРЕ ЛЕМНИСКАТА В ПРИСУТСТВИИ ВИХРЕВОЙ ФАЗОВОЙ СИНГУЛЯРНОСТИ С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ЗАРЯДА ВХОДНОГО ПОЛЯ

М.С. Павленко¹

¹Самарский университет, г. Самара
e-mail: maripav02@gmail.com

Аннотация

Исследуется дифракция на контурной апертуре “Лемниската” в присутствии вихревой фазовой сингулярности на различных расстояниях от дифракционного элемента. Численное моделирование проведено на основе двумерного преобразования Фурье от лемнискаты толщиной $\Delta=0,7$. Рассмотрены различные расстояния z и порядки вихря с целью определения наилучших параметров для определения топологического заряда вихря входного поля.

Ключевые слова: вихревой пучок, топологический заряд, дифракционный оптический элемент, фокальная область, параксиальная область.

Введение

Оптические силы применяются в задачах оптической манипуляции микро- и наночастицами [1], транспортировки диэлектрических частиц [2], лазерного охлаждения [3], обработки материалов и очистки поверхностей [4, 5]. Это происходит благодаря возможности формировать поля с высокими градиентами интенсивности и независимым управлением фазовым распределением.

Благодаря совместному управлению интенсивностью и фазовыми градиентами расширяются возможности инструментов лазерной микрообработки [6].

В связи с этим представляет интерес обратная задача по определению порядка фазовой сингулярности (топологического заряда) входного вихревого пучка по характеристикам сформированного светового распределения в фокальной плоскости. Актуальность данной задачи обусловлена необходимостью диагностики вихревых мод в системах оптической манипуляции и структурирования.

1. Результаты численного моделирования

Данная работа направлена на моделирование влияния фазовой сингулярности входного оптического поля на структуру распределения интенсивности излучения после прохождения через дифракционный оптический элемент (ДОЭ). В нашем случае дифракционный оптический элемент, представляет собой светонепроницаемую пластину с протравленным контуром в виде лемнискаты, функция пропускания такого элемента имеет вид:

$$\tau(r) = \begin{cases} 1, & |\rho^2 - 2c^2 * \cos(2\varphi)| \leq \Delta \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (1)$$

где $\varphi = \arctg\left(\frac{y}{x}\right)$, $\rho = x^2 + y^2$, $\Delta = 0,7$, $c = 2.5$.

Оптический элемент освещается вихревым пучком с фазовой функцией U , описывающей зависимость от пространственных координат величины набега фазы:

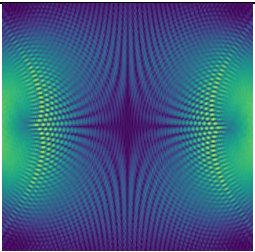
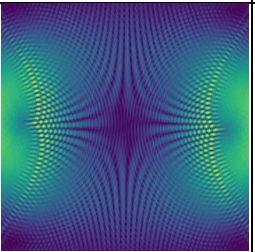
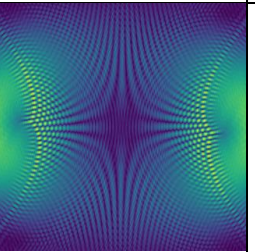
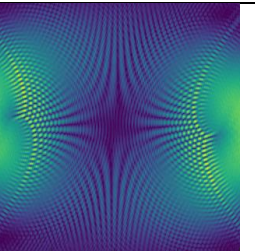
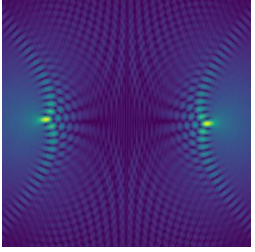
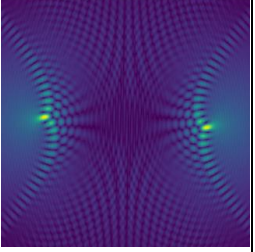
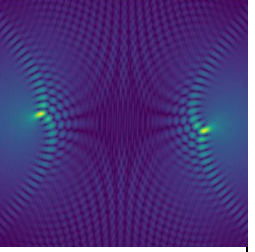
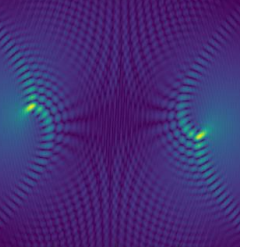
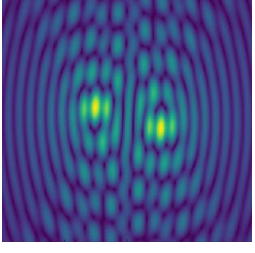
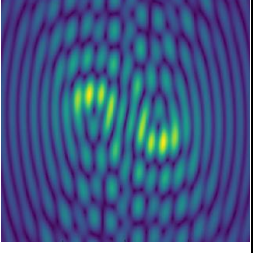
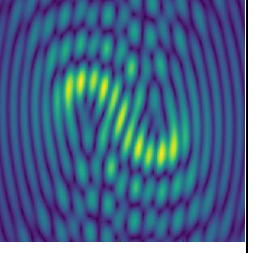
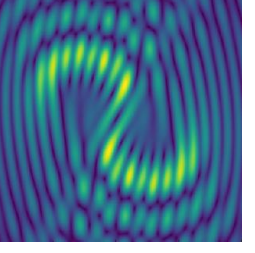
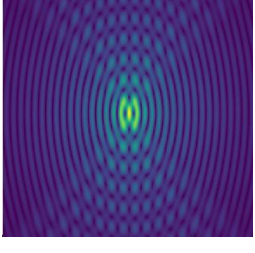
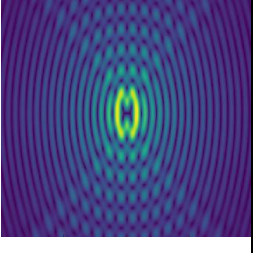
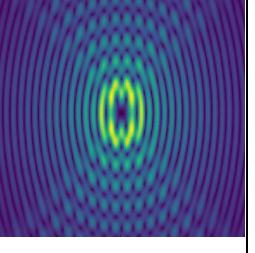
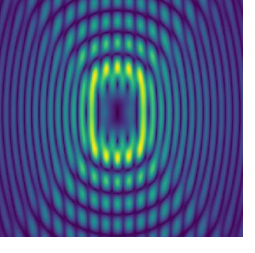
$$U = e^{im\varphi}, \quad (2)$$

где m – топологический заряд.

Дифракционное поле, после прохождения через элемент, описывается двумерным преобразованием Фурье в фокальной плоскости линзовой системы и интегралом дифракции Френеля в параксиальной области.

Смоделируем распределения, образованные при дифракции в параксиальной области и в фокальной области. Причем для каждого порядка фазового вихря m будем смотреть распределения, образованные на различных расстояниях от дифракционного элемента и при различных значениях топологического заряда m .

Таблица 1 – Результаты моделирования

z, мм	m = 2	m = 5	m = 8	m = 15
500				
1000				
10000				
Зона Фурье				

Из таблицы 1 видно, что вблизи дифракционного элемента наблюдаются два выраженных локальных максимума. По мере увеличения расстояния z максимумы

сближаются, усиливается интерференция в центральной области и распределение становится более структурированным. При больших значениях z распределение интенсивности асимптотически приближается к картине, наблюдаемой в фокальной области, что соответствует предельному переходу от дифракции Френеля к дифракции Фраунгофера.

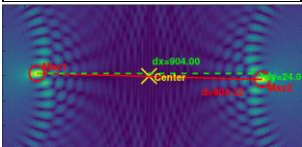
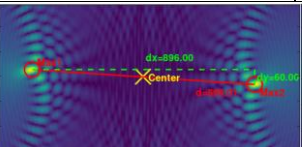
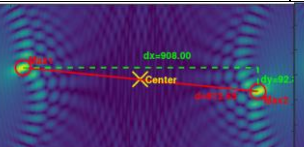
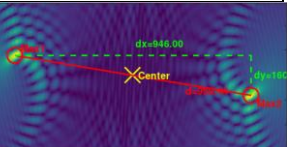
Увеличение топологического заряда m приводит к различным изменениям структуры поля в зависимости от расстояния z до плоскости наблюдения.

При $z=500$ мм и $z=1000$ мм наблюдается взаимное смещение максимумов интенсивности, величина которого возрастает с увеличением топологического заряда.

При $z=10000$ мм вследствие усиления интерференционных эффектов дифракционная картина существенно усложняется: возрастает число локальных максимумов интенсивности, структура поля становится более детализированной, а интерференционные полосы более плотными.

Рассмотрим отдельно изменения в распределениях интенсивности при $z = 1000$ мм. В таблице 2 наглядно показано смещение максимумов интенсивности в пикселях относительно друг друга при увеличении топологического заряда.

Таблица 2 – Смещение максимумов интенсивности

$m = 2$	$m = 5$	$m = 8$	$m = 15$
			
$d = 904.32$ $d_x = 904$ $d_y = 24$	$d = 898.01$ $d_x = 896$ $d_y = 60$	$d = 912.65$ $d_x = 908$ $d_y = 92$	$d = 959.44$ $d_x = 946$ $d_y = 160$

Из результатов, представленных в таблице 2, видно, что взаимное смещение ярких максимумов вдоль вертикальной оси d_y возрастает пропорционально топологическому заряду с коэффициентом пропорциональности k примерно равным 12.

$$d_y = km. \quad (3)$$

Особенно наглядно данная зависимость проявляется при малых значениях m . Однако при дальнейшем увеличении топологического заряда наблюдается накопление погрешности, приводящее к отклонению от указанной зависимости.

Заключение

Проведено исследование дифракции на контурной апертуре “Лемниската” в присутствии вихревой фазовой сингулярности различного порядка в параксиальной и фокальной областях. Получены картины дифракции при различных параметрах m и z .

Было показано, что в результате дифракции на контурной апертуре лемниската за дифракционным элементом образуется световое поле, не сохраняющее свою структуру с увеличением расстояния.

В зависимости от расстояния наблюдаются различные структуры распределений световых полей и их изменения связанные с увеличением величины топологического заряда.

В ходе исследований было определено, что для различных расстояний от дифракционного элемента могут быть использованы различные особенности световых полей для определения порядка вихревой сингулярности входного поля.

Список использованных источников

1. Kudo, T. Proposed nonlinear resonance laser technique for manipulating nanoparticles / T. Kudo, H. Ishihara // *Physical Review Letters*. – 2012. – V. 109. – P. 1–5.
2. Direct observation of transfer of angular momentum to absorptive particles from a laser beam with a phase singularity / He H., Friese M., Heckenberg N., Rubinsztein-Dunlop H. // *Physical Review Letters*. – 1995. – V. 75. – P. 826–829.
3. Wieman, C. Atom cooling, trapping, and quantum manipulation / C. Wieman, D. Pritchard, D. Wineland // *Reviews of Modern Physics*. – 1999. – V. 71. – P. S253–S262.
4. Gattass, R. R. Femtosecond laser micromachining in transparent materials / R. R. Gattass, E. Mazur // *Nature Photonics*. – 2008. – V. 2. – P. 219–225.
5. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids / B. N. Chichkov, C. Momma, S. Nolte, A. Tünnermann // *Applied Physics A*. – 1996. – V. 63. – P. 109–115.
6. Light-induced spiral mass transport in azo-polymer films under vortex-beam illumination / L. Ambrosio, L. Marrucci, F. Borbone, A. Roviello, P. Maddalena // *Nature Communications*. – 2012. – V. 3, № 989.

SIMULATION OF DIFFRACTION AT A CONTOUR LEMNISCATE APERTURE IN THE PRESENCE OF A VORTEX PHASE SINGULARITY FOR DETERMINING THE TOPOLOGICAL CHARGE OF THE INCIDENT FIELD.

M.S. Pavlenko¹

¹*Samara University, Samara
e-mail: maripav02@gmail.com*

Abstract

Diffraction at a contour aperture in the shape of a “lemniscate” in the presence of a vortex phase singularity at various distances from the diffractive element is investigated. Numerical simulation is performed on the basis of the two-dimensional Fourier transform of a lemniscate of thickness $\Delta = 0.7$. Various propagation distances z and vortex orders are considered in order to determine the optimal parameters for identifying the topological charge of the vortex of the incident field.

Keywords: vortex beam, topological charge, diffractive optical element, focal region, paraxial region.