

Исследование распространения световых кривых в свободном пространстве

Л.Б. Дубман
Самарский национальный
исследовательский университет
им. академика С.П. Королева
Самара, Россия
lyuba.dubman13@gmail.com

Аннотация — Исследуется формирование световых кривых с использованием преобразования Гилиса и распространение их в свободном пространстве.

Ключевые слова — световые кривые, преобразование Гилиса, преобразование Фурье, интеграл Уиттекера, преобразование Френеля

$$R(t) = \left| \cos\left(\frac{m}{c} \cdot t\right) \right|^{\frac{1}{n_4}} \cdot \left[\left| \frac{1}{a} \cdot \cos\left(\frac{m}{4} \cdot t\right) \right|^{n_2} + \left| \frac{1}{b} \cdot \sin\left(\frac{m}{4} \cdot t\right) \right|^{n_3} \right]^{\frac{-1}{n_1}} \quad (3)$$

На рис. 1 представлены кривые, построенные по формуле (3).



Рис. 1. Графики кривых а) герани; б) брутника; в) щавеля

I. ВВЕДЕНИЕ

Генерация оптических полей с заданной амплитудой и фазовым распределением является очень актуальной проблемой в области оптического манипулирования и лазерной обработке материалов [1-3].

Для реализации динамического управления структурой пучка, например, с помощью пространственного модулятора света, удобнее всего использовать аналитический подход [4] или быстрые алгоритмы расчета [5, 6] комплексных функций пропускания оптических элементов. В случае генерации двумерных и трехмерных световых кривых [7-9] эффективно использование интеграла Уиттекера [7, 8].

В данной работе исследуется формирование световых кривых с использованием преобразования Гилиса [10] и интеграла Уиттекера, а также распространение их в свободном пространстве с применением преобразования Френеля на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ).

II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Выполнить расчёт комплексной функции для построения фокальных световых кривых можно с применением интеграла Уиттекера [7, 8]:

$$E(x, y) = \int_0^T w(t) \cdot e^{-i \cdot \frac{2\pi}{\lambda f_0} \cdot R(t) \cdot (x \cdot \cos(t) + y \cdot \sin(t))} dt, \quad (1)$$

где $R(t)$ – радиус, изменяемый в соответствии с функцией кривой [8].

Описание различных кривых на основе преобразования Гилиса [10] имеет следующий вид:

$$R(t) = \rho(t) \cdot \left[\left| \frac{1}{a} \cdot \cos\left(\frac{m}{4} \cdot t\right) \right|^{n_2} + \left| \frac{1}{b} \cdot \sin\left(\frac{m}{4} \cdot t\right) \right|^{n_3} \right]^{\frac{-1}{n_1}} \quad (2)$$

Использование преобразования Гилиса путем нахождения соответствующих значений параметров позволяет моделировать сложные формы. Если применить формулу (2) к уравнению розы Гранди, то выражение примет следующий вид [10, 11]:

III. ФОРМИРОВАНИЕ И РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПУЧКОВ

Для расчета поля, формирующего заданную кривую, использовалось выражение (1). Рассмотрим ситуацию, когда градиент интенсивности и фазы отсутствует ($w(t) = 1$). Заметим, что фаза поля, вычисленная с помощью каждого из двух методов: интеграла Уиттекера (1) и БПФ, имеют близкую структуру (см. таблицу I).

Таблица I. СРАВНЕНИЕ ФАЗ, ВЫЧИСЛЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕГРАЛА УИТТЕКЕРА И С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БПФ

Отрисованные параметрические кривые	Поле, рассчитанное по формуле (1)	БПФ, вычисленное для соответствующих параметрических кривых

В таблице II показаны примеры фокальных световых кривых при различных $w(t)$, которые определяют распределение интенсивности и фазы вдоль кривой. С помощью весовой функции $w(t)$ можно формировать вихревые световые кривые [12].

Таблица II. ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДЫ И ФАЗЫ ПУЧКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ w

Условное обозначение	Амплитуда		Фаза	
	$w(t) = 1$	$w(t) = \sin(4t)$	$w(t) = 1$	$w(t) = \sin(4t)$
Шести-угольник				

Результаты моделирования распространения световых кривых в свободном пространстве при

различных значениях z , полученные с использованием преобразования Френеля, приведены в таблице III. Распространение пучков при изменении значения порождающей функции и параметра, отвечающего за вид кривой представлено в таблице IV. Отметим, что на больших расстояниях ($z = 20000$ мм) амплитудное распределение приобретает контур, соответствующий заданным кривым.

Таблица III. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПУЧКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ z (НАРЦИСС)

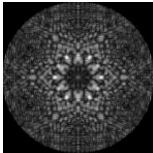
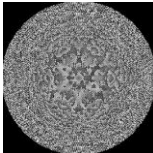
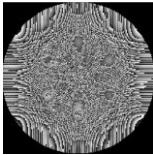
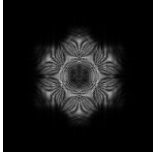
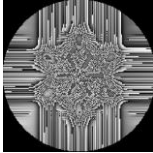
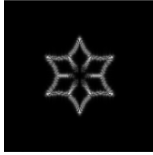
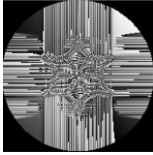
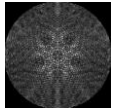
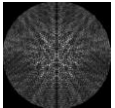
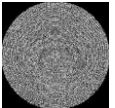
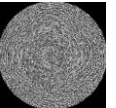
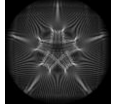
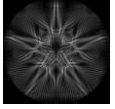
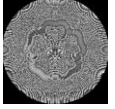
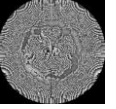
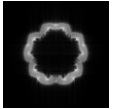
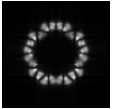
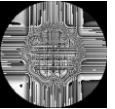
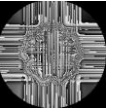
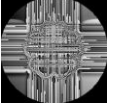
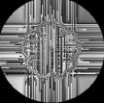
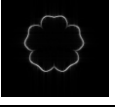
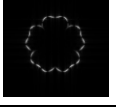
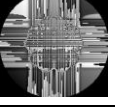
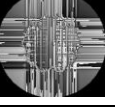
Значение параметра, отвечающего за вид распределения	Амплитуда	Фаза
$z = 100$ мм		
$z = 400$ мм		
$z = 1000$ мм		
$z = 5000$ мм		
$z = 20000$ мм		

Таблица IV. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПУЧКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ z и w (ПЕТУНИЯ)

Параметр, отвечающий за вид	Амплитуда при $w(t)=1$	Амплитуда при $w(t) = \sin(12t)$	Фаза при $w(t) = 1$	Фаза при $w(t) = \sin(12t)$
$z = 100$ мм				
$z = 400$ мм				

ПРОДОЛЖЕНИЕ ТАБЛИЦЫ IV

$z = 2500$ мм				
$z = 5000$ мм				
$z = 20000$ мм				

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано формирование и распространение световых кривых в свободном пространстве. Для формирования произвольных контурных кривых, заданных в параметрической форме, были рассчитаны фазы входных полей, которые можно использовать при реализации дифракционного оптического элемента. Использование преобразования Гилиса для моделирования сложных форм кривых обеспечивает определенную степень вращательной симметрии, а также разнообразную форму лепестков. Моделирование распространения пучков в свободном пространстве показало сохранение исходной симметрии кривой.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Yang, Y. Optical trapping with structured light: a review / Y. Yang, Y.-X. Ren, M. Chen, Y. Arita, and C. Rosales-Guzmán // *Advanced Photonics*. – 2021. – Vol. 3(3). – P. 34001–34040.

[2] Jesacher, A. Full Phase and Amplitude Control of Holographic Optical Tweezers with High Efficiency / A. Jesacher, C. Maurer, A. Schwaighofer, S. Bernet, M. Ritsch-Marte // *Optics Express*. – 2008. – Vol. 16(7). – P. 4479–4486. DOI: 10.1364/OE.16.004479.

[3] Kuchmizhak, A. On-fly femtosecond-laser fabrication of self-organized plasmonic nanotextures for chemo- and biosensing applications / A. Kuchmizhak, E. Pustovalov, S. Syubaev [et al.] // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. – 2016. – Vol. 8(37). – P. 24946–24955.

[4] Doskolovich, L. Analytical Design of Freeform Optical Elements Generating an Arbitrary-Shape Curve / L. Doskolovich, A. Dmitriev, E. Bezus [et al.] // *Appl. Opt.* – 2013. – Vol. 52. – P. 2521–2526.

[5] Tang, X. Rapidly and accurately shaping the intensity and phase of light for optical nano-manipulation / X. Tang, F. Nan, Z. Yan // *Nanoscale Adv.* – 2020. – Vol. 2. – P. 2540–2547.

[6] Khonina, S.N. Techniques for Encoding Composite Diffractive Optical Elements / S.N. Khonina, V.V. Koltzhar, V.A. Soifer // *Proceedings SPIE*. – 2003. – Vol. 5036. – P. 493–498.

[7] Rodrigo, J. A. Polymorphic beams and Nature inspired circuits for optical current / J. A. Rodrigo, T. Alieva // *Scientific Reports*. – 2016. – Vol. 6. DOI: 10.1038/srep35341.

[8] Khonina, S.N. Generation of multi-contour plane curves using vortex beams / S.N. Khonina, A.P. Porfirev // *Optik (Jena)*. – 2021. – Vol. 229. DOI: 10.1016/j.ijleo.2021.166299.

[9] Фролов, А.О. Изменение траектории наборов пучков Эйри с помощью несущих пространственных частот / А.О. Фролов, А.В. Устинов, С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика*. – 2022. – Т. 46, № 5. – С. 724–732.

[10] Gielis, J. A. A generic geometric transformation that unifies a wide range of natural and abstract shapes / J. A. Gielis // *Am. J. Bot.* – 2003. – Vol. 90. – P. 333–338. DOI: 10.3732/ajb.90.3.333.

[11] Spíchal, L. Superelipsa a superformule / L. Spíchal // *Matematika-Fyzika-Informatika*. – 2020. – Vol. 29(1). – P. 54–69.

[12] Soifer, V.A. Spiral Caustics of Vortex Beams / V.A. Soifer, S.I. Kharitonov, S.N. Khonina, Y.S. Strelkov, A.P. Porfirev // *Photonics*. – 2021. – Vol. 8(1). DOI:10.3390/photonics8010024.