

Разработка аппаратно-программного комплекса для построения спиральных пучков света

К.В. Ефимова^{1,2}, С.А. Кишкин¹, С.П. Котова¹, Д.В. Прокопова^{1,2}

¹Самарский филиал ФИАН, Ново-Садовая 221, Самара, Россия, 443011

²Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. Разработан макетный образец комплекса для формирования спиральных пучков света. Описано специализированное программное обеспечение, позволяющее вычислять комплексные амплитуды структурно – устойчивых световых полей с заданным распределением интенсивности. Приведены результаты численного моделирования и натурального эксперимента.

1. Введение

В прикладных задачах оптики достаточно часто возникает необходимость в конструировании световых полей с заданными характеристиками [1]. Так, одной из важных составляющих светового поля является его распределение интенсивности. В работе [2] был найден новый класс автомодельных решений параболического уравнения в параксиальном приближении, которые были названы спиральными пучками света. Они при распространении в пространстве сохраняют неизменной пространственную структуру распределения интенсивности, происходит лишь поворот картины и изменение в масштабе. При этом они обладают угловым орбитальным моментом, что является весьма полезным для задач манипуляции микроскопическими объектами, квантовой передачи информации и ряда других применений. Спиральные пучки могут иметь различные распределения интенсивности, в том числе могут быть заданы в поперечном сечении в форме произвольной плоской кривой [3,4].

Процедура формирования спиральных пучков является нетривиальной задачей. Из существующих методов генерации спиральных пучков нами был выбран голографический, так как он обладает большей эффективностью и лучшим качеством сформированных кривых [5]. В данной работе представлены результаты разработки аппаратно-программного комплекса, позволяющего в реальном времени построить спиральный пучок в форме произвольной кривой, заданной в виде контурного изображения.

2. Расчет комплексных амплитуд спиральных пучков

Было найдено аналитическое выражение [4], позволяющее построить комплексную амплитуду спирального пучка с интенсивностью в виде произвольной плоской кривой $\zeta(t)$.

$$S(z, \bar{z} | \zeta(t), t \in [0, T]) = \exp\left\{\frac{-z\bar{z}}{\rho^2}\right\} f(z) = \exp\left\{\frac{-z\bar{z}}{\rho^2}\right\} \times \int_0^T \exp\left\{-\frac{\zeta(t)\bar{\zeta}(t)}{\rho^2} + \frac{2z\bar{\zeta}(t)}{\rho^2} + \frac{1}{\rho^2} \int_0^t [\bar{\zeta}(\tau)\zeta'(\tau) - \zeta(\tau)\bar{\zeta}'(\tau)] d\tau\right\} |\zeta'(t)| dt, \tag{1}$$

где ρ – гауссов параметр пучка, штрих означает производную по переменной t , z – комплексная координата, черта означает комплексное сопряжение. Этот интеграл, в общем случае, для произвольной кривой – не берется в элементарных функциях. Для вычисления комплексных амплитуд впервые было разработано специализированное программное обеспечение (ПО), которое позволяет в реальном времени формировать соответствующие спиральные пучки. Программное обеспечение позволяет производить расчет комплексной амплитуды спирального пучка на основе растровых изображений форматов *.jpg, *.png, *.png, содержащих порождающую кривую. При этом задаваемая пользователем кривая может состоять как из одного контура, так и из нескольких, что позволяет рассчитывать спиральные пучки со сложным пространственным распределением интенсивности. Для того, чтобы разработанное программное обеспечение при взаимодействии с ЖК ПМС могло формировать структурно-устойчивое световое поле вдоль всей оси распространения, был добавлен функционал расчета тонких голограмм, при котором значение интенсивности пучка кодируется его фазой. Профиль фазы может быть выбран синусоидальным или треугольным, последний при этом позволяет получать голограммы «с блеском», обладающие повышенной энергетической эффективностью.

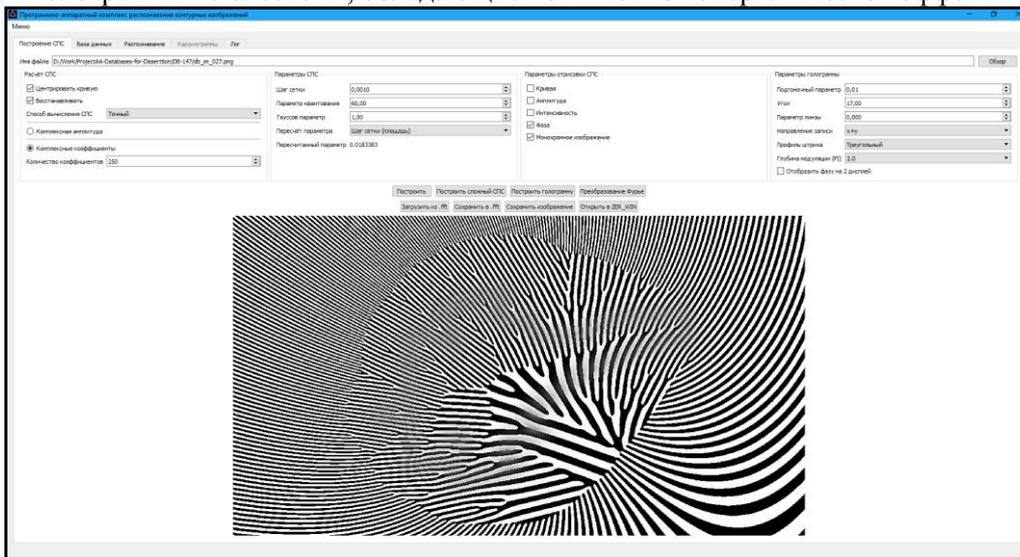


Рисунок 1. Экранная форма разработанного ПО.

На рисунке 2 представлен пример получения фазы и амплитуды спирального пучка в форме границы елки.



Рисунок 2. Порождающая кривая, интенсивность и фаза спирального пучка в градациях серого.

3. Аппаратная часть

Схема аппаратной части комплекса представлена на рисунке 3. Фазовая голограмма, рассчитанная с помощью разработанного ПО, формируется с использованием ЖК ПМС HOLOEYE 1080P (размеры активной зоны: 15,36 x 8,64 мм; количество управляемых

элементов: 1920 x 1080, размер одного пикселя равен 8 мкм). Голограмма спирального пучка восстанавливается пучком твердотельного лазера ($\lambda=532$ нм, $P_{\max}=50$ мВ), расширенным при помощи коллиматора.

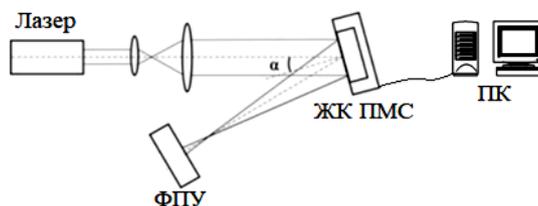


Рисунок 3. Схема установки.

На рисунке 4 показаны результаты восстановления голограммы спирального пучка в виде контура ели, которые были зарегистрированы с помощью фотоприемного устройства (ФПУ) Canon EOS 350D. Видно, что изображение спирального пучка масштабируется и совершает поворот. Эффективность формирования полей данным методом составила 11%. Она определялась, как отношение интенсивности, приходящейся на восстановленный с голограммы спиральный пучок в первом порядке дифракции, ко всей интенсивности в плоскости регистрации.



Рисунок 4. Полученные распределения интенсивности спирального пучка с шагом 4 см от плоскости фокусировки $F = 42$ см.

4. Заключение

Для реализации голографического метода генерации спиральных пучков разработан аппаратно – программный комплекс, позволяющий: вычислять комплексные амплитуды спиральных пучков, вычислить цифровые голограммы с заданными свойствами, передавать в реальном времени рассчитанную голограмму на ЖК ПМС и восстанавливать ее. Описаны аппаратные составляющие комплекса по восстановлению таких полей. Эффективность формирования полей данным методом составила 11%.

5. Литература

- [1] Rubinsztein-Dunlop, H. Roadmap on structured light / H. Rubinsztein-Dunlop, A. Forbes, M.V. Berry, M.R. Dennis, D.L. Andrews, M. Mansuripur, C. Denz, C. Alpmann, P. Banzer, N. Bauer, E. Karimi, L. Marrucci, M. Padgett, M.Ritsch-Martel, N.M. Litchinitser, N.P. Bigelow, C. Rosales-Guzmán, A. Belmonte, J.P. Torres, T.W. Neely, M. Baker, R. Gordon, A.B. Stilgoe, J. Romero, A.G. White, R. Fickler, A.E. Willner, G. Xie, B. McMorrان, A.M. Weiner // *Journal of Optics*. – 2017. – Vol.19 (1). – P. 013001. DOI: 10.1088/2040-8978/19/1/013001.
- [2] Abramochkin, E. Spiral-type beams / E. Abramochkin, V. Volostnikov // *Optics Communications*. – 1993. – Vol. 102(3-4). – P. 336-350. DOI: 10.1016/0030-4018(93)90406-U.
- [3] Абрамочкин, Е.Г. Современная оптика гауссовых пучков / Е.Г. Абрамочкин, В.Г. Волостников. – М.: Физматлит, 2010. – 184 с.
- [4] Abramochkin, E. Spiral-type beams: optical and quantum aspects / E. Abramochkin, V. Volostnikov // *Optics Communications*. – 1996. – Т. 125, № 4. – P. 302-323. DOI: 10.3367/UFNr.0174.200412a.1273.
- [5] Efimova, K. Experimental generating of spiral beams of light / K. Efimova, S. Kotova, N. Losevsky, D. Prokopova, S. Samagin // *International Conference Laser Optics (ICLO)*. – IEEE, 2018. – P. 52. DOI: 10.1109/LO.2018.8435507.

- [6] Афанасьев, К.Н. Формирование спиральных пучков при помощи фазовых голограмм / К.Н. Афанасьев, С.А. Кишкин // Известия Самарского научного центра РАН. – 2012. – Т. 14, № 4. – С. 184-188.

Research and development of hardware and software complex device for generating of spiral beams of light

K.V. Efimova^{1,2}, S.A. Kishkin¹, S.P. Kotova¹, D.V. Prokopova^{1,2}

¹Lebedev Physical institute, Novo-Sadovaya 221, Samara, Russia, 443011

²Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract The paper describes a prototype of a complex unite for the formation of spiral beams of light. The specialized software capable of calculating complex amplitudes of structurally stable light fields with a predetermined intensity distribution is offered. The results of numerical simulation and full-scale experiment are also presented.