

Структурированный свет и тьма в спиральных вихревых пучках

А. Воляр¹, Е. Абрамочкин², Е. Разуева², М. Брецько¹, Я. Акимова¹, Ю. Егоров¹

¹Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Физико-технический институт, пр. Академика Вернадского, 4, Симферополь, Россия, 295007

²Самарский филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Ново-Садовая, 221, Самара, Россия, 443011

Аннотация

Теоретически и экспериментально рассмотрены некоторые типы спиральных пучков и объяснено, как распределение оптических токов обеспечивает их структурную устойчивость против продольного смещения и вращательной симметрии. Были изучены проблемы модовых спектров спиральных пучков, их измерение и контроль параметров.

Ключевые слова

Спиральные вихревые пучки, линии тока, структурированный свет

1. Введение

Эlegantное применение оптических вихрей в комбинированных (структурированных) вихревых пучках было впервые выполнено в [1], продемонстрировав способность оптических вихрей выделять отдельные буквы и даже слова [2,3]. Структурированный свет представляет собой сложную когерентную или квазимонохроматическую композицию [4,5] вихревых пучков с разными амплитудами, фазами, топологическими зарядами и поляризациями. Особый интерес представляют так называемые спиральные лучи, которые позволяют транслировать изображения одномерных и даже трехмерных букв, слов и сложных фигурных линий. Важно отметить, что исключительным свойством спиральных пучков является их устойчивость при распространении вплоть до масштабных преобразований.

2. Оптические токи в многоугольных спиральных пучках

Структурная устойчивость спиральных пучков математически обеспечивается выбором режимов ЛГ, и именно архитектура потоков энергии (оптические токи или линии тока) с их сложной схемой критических точек предотвращает распад сложного вихревого пучка во время распространения. Если представить замкнутую кривую на комплексной плоскости в параметрической форме, то волновая функция спирального пучка в виде замкнутой кривой ($\zeta(t)$ – эписциклоидальная кривая) записывается как суперпозиция пучков LG, где

$$c_k = \frac{2^k}{k!} \int_0^{2\pi} [\zeta^*(t)]^k |\zeta'(t)| \exp\left(-|\zeta(t)|^2 + 2i \operatorname{Im} \int_0^t \zeta^*(\tau) \zeta'(\tau) d\tau\right) dt \quad (1)$$

Компьютерное моделирование картины линий тока на рисунке 1 демонстрирует неожиданные свойства. Линии тока образуют сложный узор с множеством критических точек. Действительно, поток энергии должен не только удерживать свет в треугольной петле, но и обеспечивать стабильность структуры луча при распространении, особенно во время сильных вращающих моментов в треугольных вершинах. Показано что крутые повороты осуществляются линиями тока только в темной области треугольника, тем самым очерчивая структурированный свет и темноту. Линии тока разделены сепаратрисой на четыре большие области на рис. 1 (III).

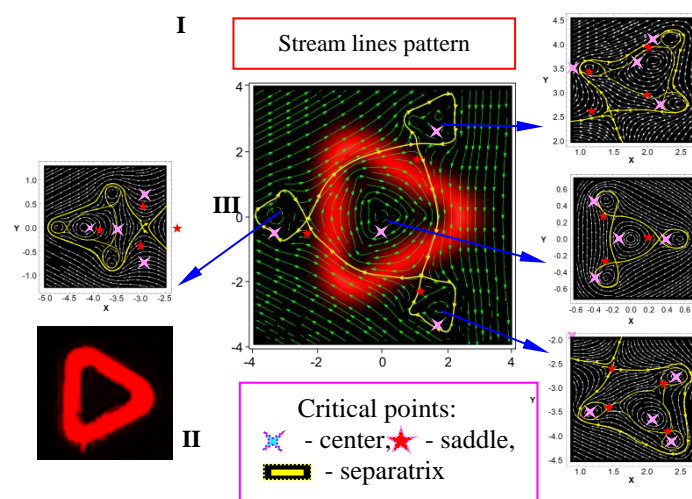


Рисунок 1: Схема линий тока треугольного спирального пучка: (I) фазовое распределение; (II) картина интенсивности на плоскости Фурье (эксперимент); (III) циркуляция оптического тока внутри и вне треугольной границы интенсивности

Центральная сепаратриса проходит через три седла и загружается еще тремя доменами. Каждая область содержит четыре критических точки, которые образуют собственную структуру линий тока, аналогичную структуре центральной сепаратрисы. Если сепаратриса в центральной области симметрично охватывает три устойчивые критические точки типа центр и проходит через три седла, то внутренняя структура двух внешних доменов немного искажается. За счет этого формируются два основных потока энергии. Внутренний поток отталкивает энергию от оси луча, в то время как внешний поток, наоборот, прижимает энергию к оси, образуя правильный треугольник. Как видно из общей структуры линий тока на рис. 1 (III), касательная кривая ко всем трем внешним потокам и сложному внутреннему потоку повторяет контуры светового треугольника, так что его можно рассматривать как *волновую каустику*.

3. Вывод

Теоретически и экспериментально рассмотрены некоторые типы спиральных пучков и объяснено, как распределение оптических токов обеспечивает их структурную устойчивость против продольного смещения и вращательной симметрии. Изучены проблемы модовых спектров спиральных пучков, их измерение и контроль параметров.

4. Литература

- [1] Abramochkin, E. Spiral-type beams: optical and quantum aspects / E. Abramochkin, V. Volostnikov // Optics Communications. – 1996. – Vol. 125. – P. 302-323.
- [2] Rubinsztein-Dunlop, H. Roadmap on structured light / H. Rubinsztein-Dunlop, A. Forbes, M.V. Berry, M.R. Dennis // Journal of Optics. – 2017. – Vol. 19. – P. 013001. DOI: 10.1088/2040-8978/19/1/013001.
- [3] Shen, Y. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities / Y. Shen, X. Wang, Z. Xie, C. Min, X. Fu, Q. Liu, M. Gong, X. Yuan // Light: Science & Applications. – 2019. – Vol. 8. – P. 90. DOI: 10.1038/s41377-019-0194-2.
- [4] Forbes, A. Structured light tailored for purpose / A. Forbes // Optics & Photonics News. – 2020. – Vol. 6. – P. 24-31.
- [5] Rodrigo, J.A. Shaping of light beams along curves in three dimensions / J.A. Rodrigo, T. Alieva, E. Abramochkin, I. Castro // Optics Express. – 2013. – Vol. 21. – P. 20544-20555. DOI: 10.1364/OE.21.020544.