

# Метод модовой декомпозиции на основе пространственной фазовой модуляции: генерация компьютерных голограмм и обработка результатов

*М. Д. Гервазиев<sup>1,2</sup>, Д. С. Харенко<sup>1,2</sup>, К. В. Серебренников<sup>2</sup>, Е. В. Подивилов<sup>1,2</sup>, Ф. Манджини<sup>3</sup>,  
М. Ферраро<sup>3</sup>, М. Дзителли<sup>3</sup>, С. Вабниц<sup>3</sup>, С. А. Бабин<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Университет Ла Сапиенца, Рим, Италия

Активные исследования ММ волокон с начала века привели к открытию ряда нетривиальных нелинейных эффектов таких, как керровская самоочистка пучка, чистка пучка на основе вынужденного комбинационного рассеяния, многомодовые пространственно-временные солитоны и т.д. Технологии и элементы на основе данных эффектов могут найти применение в таких областях, как многофотонная микроскопия, лазерная оптика, оптические транзисторы и пинцеты. Однако, сложная динамика множества поперечных мод требует новых способов характеристики излучения. Модовая декомпозиция на основе цифровой голографии хорошо зарекомендовывает себя в качестве такого метода. В данном докладе демонстрируются принципы работы метода, а также показан пример его применения для исследования термализации вихревых пучков в градиентном световоде.

*Ключевые слова:* Нелинейная волоконная оптика, модовая декомпозиция, пространственный модулятор света, цифровая голография.

*Цитирование:* Гервазиев, М. Д. Метод модовой декомпозиции на основе пространственной фазовой модуляции: генерация компьютерных голограмм и обработка результатов / М. Д. Гервазиев, Д. С. Харенко, К. В. Серебренников, Е. В. Подивилов, Ф. Манджини, М. Ферраро, М. Дзителли, С. Вабниц, С. А. Бабин // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 103–106.

## Введение

В последнее время неуклонно растёт интерес к методам полной модовой декомпозиции (МД). Благодаря тому факту, что МД даёт полную информацию о поле, метод является актуальным, например, для изучения динамики качества пучка в лазерных резонаторах [1] и структуры орбитального углового момента [2]. Параллельно с этим возродился интерес к исследованиям многомодовых (ММ) волокон после недавнего открытия новых и интригующих нелинейных эффектов в волокне с градиентным профилем показателя преломления (graded-index, GRIN). Примерами таких эффектов являются керровская самоочистка пучка [3] и генерация суперконтинуума с высокой импульсной мощностью и спектральной яркостью, которые позволяют восстановить качество входного лазерного пучка на выходе волокна, несмотря на большое количество распространяющихся поперечных мод [4]. Добавление пространственной степени свободы требует модифицированных методов анализа излучения, и МД прекрасно для этого подходит. В недавних исследованиях с помощью МД были исследованы керровская самоочистка [5], а также пространственная чистка пучка на основе

вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) [6]. Целью данной работы является исследование особенностей метода модовой декомпозиции, а также применение метода к пучкам, обладающим ненулевым орбитальным угловым моментом (orbital angular momentum, OAM).

## 1. Экспериментальные методы

Базисом для GRIN MM волокна является набор ортонормированных Гаусс-Лаггеровских (Laguerre-Gauss, LG) мод. Ортонормированность базиса подразумевает, что определение амплитуды моды требует вычисления её скалярного произведения с полем. Экспериментально это сводится к модуляции поля с помощью дифракционного оптического элемента с функцией пропускания, пропорциональной комплексно сопряженной моде. Пространственный модулятор света (spatial light modulator, SLM) позволяет в реальном времени менять функцию пропускания для каждой моды. Однако, коммерчески-доступные SLM эффективно накладывают только фазовую модуляцию. Эта проблема решается с помощью разложения Якоби-Ангера, теоремы о свертке и равенства Парсеваля. Вычисляются компьютерные голограммы, позволяющие определять относительный модовый вклад, измеряя интенсивность в определенной точке фокальной плоскости линзы. Аналогичным способом, с помощью двух голограмм определяется межмодовая интерференция, откуда вычисляется значение фазы моды относительно фундаментальной. Обладая информацией об амплитудах и фазах, можно восстановить пучок для сравнения с исходным, что дает представление о корректности проведенной МД.

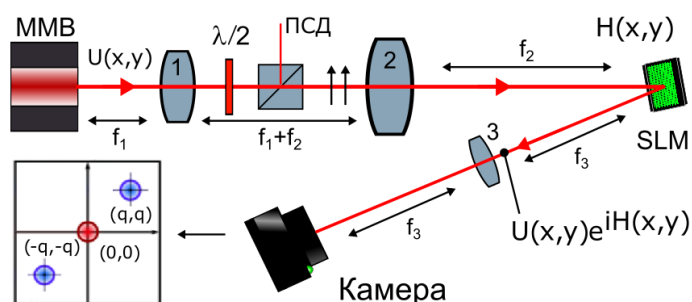


Рис. 1. Экспериментальная установка.  $U(x,y)$  – поле,  $H(x,y)$  – фазовая маска.

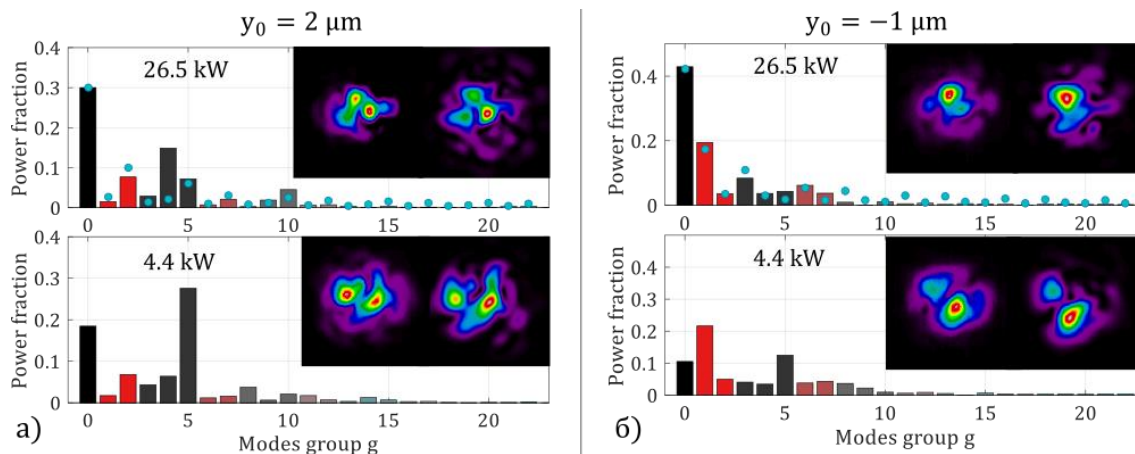
На рис. 1 продемонстрирована экспериментальная установка для проведения МД. Линзы 1 и 2 позволяют коллимировать и увеличить пучок на SLM, увеличивая тем самым эффективное разрешение модулятора. Так как SLM работает только с горизонтальной поляризацией, на выходе из волокна размещается поляризационный светоделитель (ПСД). В фокальной плоскости размещается камера для измерения интенсивности в центре корреляционного отклика.

Несмотря на то, что метод уже позволил получить некоторые значительные результаты [4,5], весь его потенциал всё ещё остаётся не раскрыт.. Например, требует повышения точность восстановления фаз. На величину ошибки может влиять уровень шума

на камере, и на данный момент исследований этой проблемы не проводилось. Поведение фаз вызывает особый интерес в контексте упомянутых выше нелинейных эффектов, в которых ожидается синхронизация фаз поперечных мод. Также на данный момент отсутствует количественный показатель схожести исходного и восстановленного пучков – все сравнения носят качественный характер. Однако, даже без описанных усовершенствований МД может быть успешно применена для актуальной задачи определения модового состава пучков, обладающих ненулевым ОАМ и измерения его полного значения.

## 2. Результаты и обсуждения

Результаты измерений приведены на рис. 2. Продемонстрированы распределения мод в случае положительного (рис. 2 (а)) и отрицательного (рис. 2(б)) значений ОАМ для двух значений мощности. На вставках исходный пучок расположен слева, восстановленный справа. Качественно пучки обладают сходством, а распределение мод в случае высокой мощности приближается к теоретически ожидаемому (обозначенно голубыми точками) обобщенному распределению Рэля-Джинса (R), что соответствует установлению теплового равновесия излучения. При этом экспериментально продемонстрировано, что при термализации сохраняются значения продольной компоненты полного импульса, а также значение ОАМ, что также предсказывалось теорией. Экспериментальные значения совпадают с теоретическими.



**Рис. 2.** Распределения мод излучения для двух различных условий заведения, а) – соответствует положительному значению ОАМ, б) – отрицательному. [7]

## Заключение

Таким образом, экспериментально определены параметры, сохраняющиеся при повышении мощности излучения, что вкупе с распределением мод близким к RJ указывает на установление теплового равновесия. Результаты получены с помощью метода МД, увеличение точности и скорости которого позволит наблюдать и более тонкие нелинейные эффекты в ММ волокнах.

## Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (21-72-30024).

## Список источников

- [1] **Schmidt, O. A.** Real-time determination of laser beam quality by modal decomposition / C. Schulze, D. Flamm, R. Brüning, T. Kaiser, S. Schröter, M. Duparré // Optics express. – 2011. – Vol. 19. – №. 7. – P. 6741-6748.
- [2] **Litvin, I. A.** Poynting vector and orbital angular momentum density of superpositions of Bessel beams / A. Dudley, A. Forbes // Optics Express. – 2011. – Vol. 19. – №. 18. – P. 16760-16771.
- [3] **Krupa, K.** Spatial beam self-cleaning in multimode fibres / A. Tonello, B. M. Shalaby, M. Fabert, A. Barthélémy, G. Millot, S. Wabnitz, V. Couderc // Nature Photonics. – 2017. – Vol. 11. – №. 4. – P. 237-241.
- [4] **Niang, A.** Spatial beam self-cleaning and supercontinuum generation with Yb-doped multimode graded-index fiber taper based on accelerating self-imaging and dissipative landscape / T. Mansuryan et al. // Optics express. – 2019. – Vol. 27. – №. 17. – P. 24018-24028.
- [5] **Mangini, F.** Statistical mechanics of beam self-cleaning in GRIN multimode optical fibers / M. Gervaziev, M. Ferraro, D. S. Kharenko, M. Zitelli, Y. Sun, V. Couderc, E. V. Podivilov, S. A. Babin, S. Wabnitz // Optics Express. – 2022. – Vol. 30. – №. 7. – P. 10850-10865.
- [6] **Kharenko, D. S.** Mode-resolved analysis of pump and Stokes beams in LD-pumped GRIN fiber Raman lasers / M. D. Gervaziev, A. G. Kuznetsov, E. V. Podivilov, S. Wabnitz, and S. A. Babin // Optics Letters. – 2022. – Vol. 47. – №. 5. – P. 1222-1225.
- [7] **Podivilov, E. V.** Thermalization of orbital angular momentum beams in multimode optical fibers / F. Mangini, O. S. Sidelnikov, M. Ferraro, M. Gervaziev, D. S. Kharenko, M. Zitelli, M. P. Fedoruk, S. A. Babin, and S. Wabnitz // Physical Review Letters. – 2022. – Vol. 128. – №. 24. – P. 243901.

## Mode decomposition method based on spatial phase modulation: digital hologram generation and results processing

*M. D. Gervaziev<sup>1, 2</sup>, D. S. Kharenko<sup>1, 2</sup>, K. V. Serebrennikov<sup>2</sup>, E. V. Podivilov<sup>1, 2</sup>, F. Mangini<sup>3</sup>, M. Ferraro<sup>3</sup>, M. Zitelli<sup>3</sup>, S. Wabnitz<sup>3</sup>, S. A. Babin<sup>1, 2</sup>*

1 Institute of Automation and Electrometry of the SB RAS, Novosibirsk, Russia

2 Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

3 Sapienza University of Rome, Rome, Italy

Active research of multimode fibers since the beginning of the century has led to discovery of several nontrivial nonlinear effects (Kerr beam self-cleaning, Raman beam cleaning, multimode spatiotemporal solitons, etc). Technologies based on these effects can find applications in different fields: multiphoton microscopy, laser optics, optical switching and tweezers. However, the complex dynamics of multiple transverse modes requires new ways to characterize the radiation. Mode decomposition based on computer holography is well established as such method. This paper demonstrates the principles of method and shows an example of its application to study thermalization of vortex beams in graded-index waveguide.

*Keywords:* Nonlinear fiber optics, Mode decomposition, Spatial light modulator, Computer holography.