

## ВЛИЯНИЕ ШУМОВ НА ПРОЦЕСС РЕКОНСТРУКЦИИ МНОГОМОДОВОГО ПУЧКА МЕТОДОМ МОДОВОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ \*

✉ К. В. Серебренников<sup>1</sup>, М. Д. Гервазиев<sup>1,2</sup>,  
А. Ю. Кохановский<sup>3</sup>, М. К. Неваев<sup>4</sup>, Д. С. Харенко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup> ЗАО «ЦФТ», Санкт-Петербург, Россия

✉ k.serebrennikov@g.nsu.ru

Современным трендом в волоконной оптике, несомненно, является переход на многомодовые волокна. Это обусловлено как их возможностью передавать излучение с гораздо более высокой мощностью, так и открытием множества новых нелинейных эффектов, таких как керровская [1] и рамановская [2] чистки пучка, генерация суперконтинуума с импульсами высокой пиковой мощности [3] и пр. Одним из многообещающих методов анализа излучения в многомодовых волокнах является метод модовой декомпозиции (МД). Полученные методом МД данные могут быть использованы при исследовании модового состава излучения, механизмов межмодового взаимодействия или нелинейных эффектов в оптических волокнах.

Одна из реализаций МД основывается на применении корреляционного фильтра (КФ) с помощью пространственного модулятора света [4]. Метод КФ доказал свою состоятельность в исследованиях нелинейных эффектов в многомодовом волокне. Особый интерес представляет поведение относительных фаз мод, однако точность их восстановления, как было показано ранее [4], значительно хуже, чем амплитуд. При этом влияние таких факторов, как уровень шумов на матрице регистрирующей камеры, до сих пор остается неисследованным, хотя данная задача является актуальной ввиду большого потенциала самого метода МД.

Мы исследуем влияние уровня оптического шума на работу алгоритма МД. С использованием численной модели нами был сгенерирован пучок без шума. Далее в процессе работы алгоритма МД мы выполнили реконструкцию пучка с добавлением различного уровня шумов.

В процессе обработки пучков нами была использована метрика для оценки подобия между исходным и восстановленным пучком. В качестве данной метрики мы применили дивергенцию Йенсена — Шеннона, так как она давала лучший результат на модельных данных по сравнению с общепринятым вычислением корреляции (скалярного произведения) между изображениями. Один из этапов работы алгоритма МД требует точного определения центра первого дифракционного максимума пучка. Поэтому в процессе работы мы исследовали зависимость качества восстановления от отстройки по обеим координатам (рис. 1, а). Результат с наименьшей метрикой соответствует наиболее удачно восстановленному пучку. Как видно на рисунке, минимум метрики соответствует отступу (0,0), что совпадает с модельными параметрами.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (№ 17-72-30006-П).

© К. В. Серебренников, М. Д. Гервазиев, А. Ю. Кохановский, М. К. Неваев, Д. С. Харенко, 2023

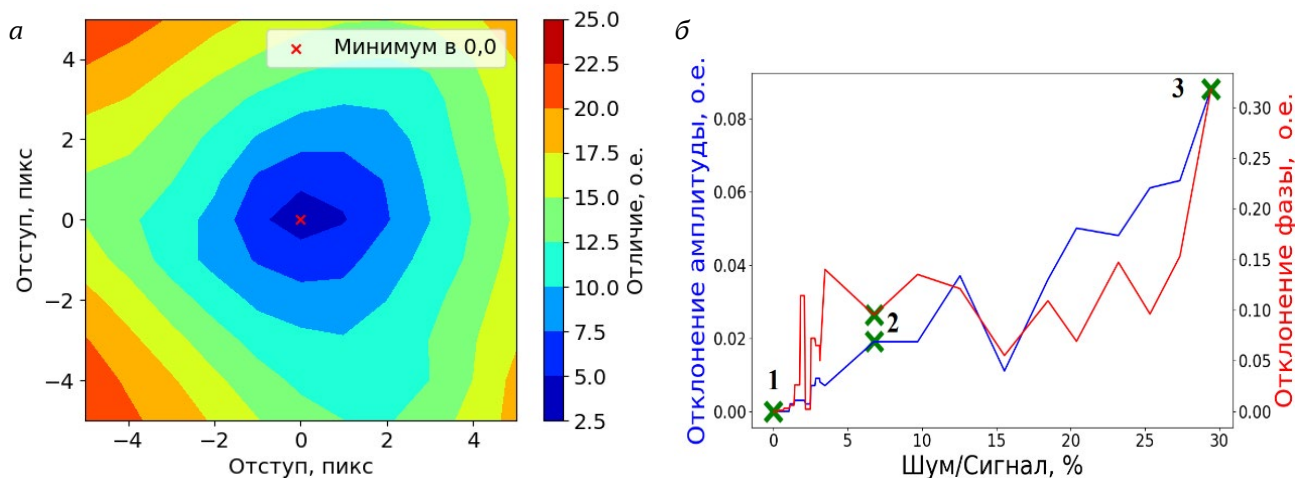


Рис. 1. Карта метрики подобия пучка для данных без шума (а); зависимость точности восстановления амплитуды и фазы от шума (б)

МД предоставляет нам данные об амплитудах и фазах мод, из которых состоит излучение, а наличие шума в исходных данных приводит к их неточному восстановлению. Для измерения точности восстановления амплитуд и фаз мы использовали скалярное произведение:  $M = 1 - \sum_i (a_i \cdot b_i)$ , где  $M$  — значение метрики,  $a_i$ ,  $b_i$  — амплитуды / фазы одной из мод в исходном и восстановленном пучке. Суммирование выполняется по всем модам пучка. Как видно на графиках (рис. 1, б), повышение уровня шума увеличивает отклонение восстановленных амплитуд и фаз от исходных. Зеленые маркеры (1, 2, 3) на рис. 1, б соответствуют пучкам, представленным на рис. 2 (а, б, в).

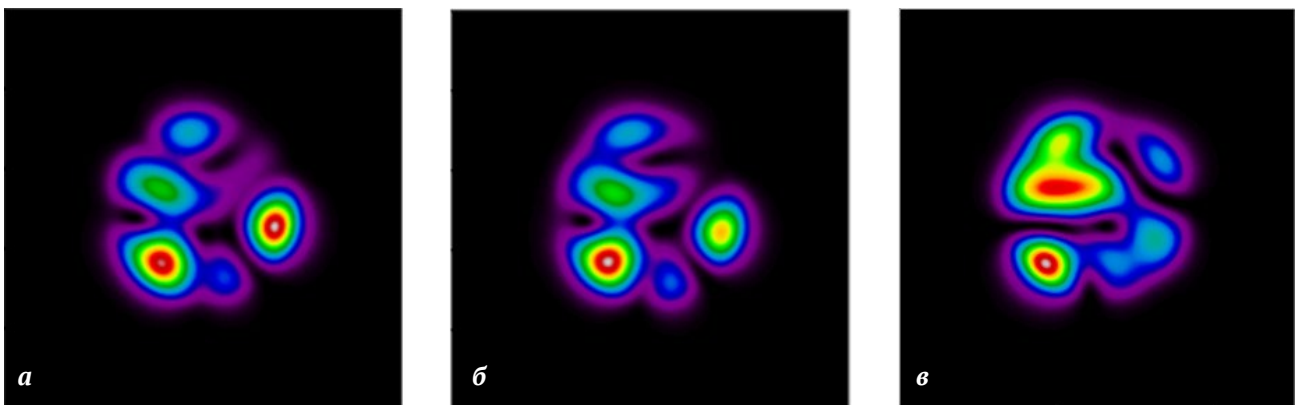


Рис. 2. Восстановленные пучки для уровня шума: а — 0 %; б — 7 %; в — 29 %

В рамках данного эксперимента был определен приемлемый уровень шума, который не приводит к серьезным изменениям пучка. Он составил 7 % от максимальной интенсивности пучка (см. рис. 2, б). Также на рис. 2, в представлен плохо восстановленный пучок, соответствующий уровню шума 29 %.

Таким образом, в данной работе нами было продемонстрировано, что шум оказывает влияние на результат работы метода модовой декомпозиции, и было определено пороговое значение шума порядка 7 %, при котором полученный результат является приемлемым.

## Список литературы

1. Krupa K. et al. Spatial beam self-cleaning in multimode fibres // Nat. Photonics. 2017. Vol. 11. P. 237–241.
2. Zlobina E. A. et al. Generating high-quality beam in a multimode LD-pumped all-fiber Raman laser // Opt. Express. 2017. Vol. 25. P. 12581.
3. Eftekhar M. A. et al. Versatile supercontinuum generation in parabolic multimode optical fibers // Opt. Express. 2017. Vol. 25. P. 9078.
4. Gervaziev M. D. et al. Mode decomposition of multimode optical fiber beams by phase-only spatial light modulator // Laser Phys. Lett. 2021. Vol. 18. P. 015101.