

ВЛИЯНИЕ ШУМОВ НА ПРОЦЕСС РЕКОНСТРУКЦИИ МНОГОМОДОВОГО ПУЧКА МЕТОДОМ МОДОВОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ

Серебренников К.В.^{1*}, **Гервазиев М.Д.**^{1,2}, **Кохановский А.Ю.**³, **Неваев М.К.**⁴,
Харенко Д.С.^{1,2}

¹ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск

² Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск

³ Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург

⁴ ЗАО "ЦФТ", г. Санкт-Петербург

*E-mail: k.serebrennikov@g.nsu.ru DOI 10.24412/2308-6920-2023-6-403-404

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 открытию множества новых нелинейных эффектов, таких как керровская [1] и рамановская [2] чистка 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). МД позволяет разложить излучение на составные части, таким образом позволяя получить набор амплитуд и относительных фаз мод, составляющих данное излучение. Полученные таким образом 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 с помощью пространственного модулятора света (SLM) [4,5]. SLM - это электронное устройство, управляемое компьютером, которое накладывает на отражаемое от поверхности матрицы излучение некоторую форму пространственной модуляции (амплитудную, фазовую или амплитудно-фазовую). Таким образом, создавая фазовые маски специального вида, мы можем вычленять амплитуды и фазы отдельных мод из излучения. Метод корреляционного фильтра доказал свою состоятельность в исследованиях нелинейных эффектов в многомодовом волокне. В частности, с его помощью был подробно описан эффект керровской самоочистки, классифицированный как термализация модового состава импульса из-за воздействия нелинейностей [6]. МД позволила получить распределение амплитуд мод пучка на выходе, которое совпало с теоретически предсказанным равновесным распределением, тем самым косвенно подтвердив справедливость применения методов статистической физики для излучения в многомодовом волокне. Особый интерес представляет поведение относительных фаз мод, однако точность их восстановления, как было показано ранее [5], 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 крайне актуальной ввиду большого потенциала самого метода МД.

В данной работе мы исследуем влияние уровня оптического шума на работу алгоритма МД. Используя численную модель, 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 нами были использована дивергенция Йенсена – Шеннона так как она давала лучший результат на модельных данных по сравнению с общепринятым вычислением корреляции (скалярного произведения) между изображениями. Метрика записывается в виде:

$$JSD(P||Q) = \frac{1}{2} D(P||M) + \frac{1}{2} D(Q||M),$$

Где $M = \frac{1}{2}(P + Q)$, $D(P||Q) = \sum_{i=1}^n p_i \log \frac{p_i}{q_i}$ – дивергенция Кульбака – Лейблера, P и Q – исследуемые распределения интенсивностей, p_i и q_i – пиксели сравниваемых изображений. 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 обоим координатам (Рис. 1а). Результат с наименьшей метрикой соответствует наиболее удачно восстановленному пучку. Как видно из рисунка минимум метрики соответствует отступу (0,0) что совпадает с модельными параметрами.

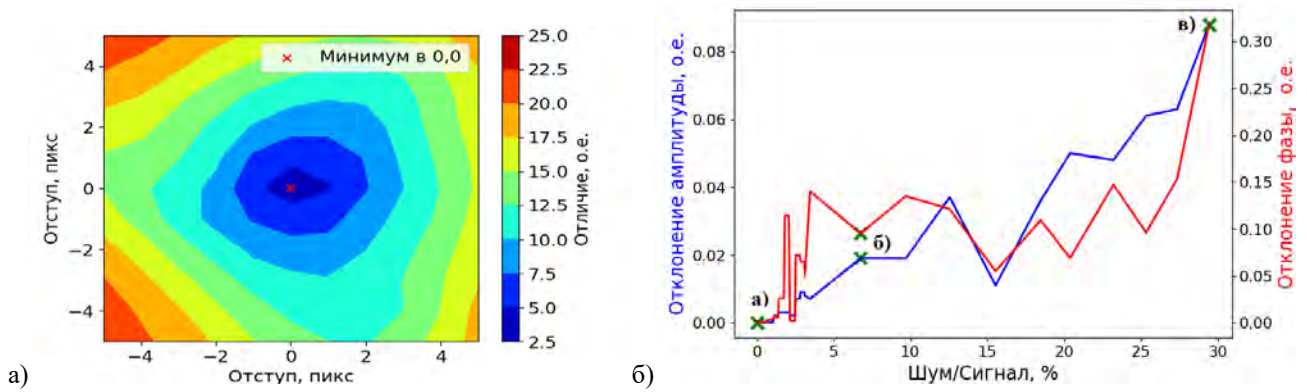


Рис. 1. а) карта метрики подбора пучка для данных без шума, б) зависимость точности восстановления амплитуды и фазы от шума

Как говорилось ранее МД предоставляет нам данные о 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 – амплитуда/фаза одной из мод в исходном пучке, b_i – амплитуда/фаза одной из мод в восстановленном пучке. Суммирование выполняется по всем модам пучка. Полученная зависимость представлена на Рис. 1б. Как видно из графиков повышение уровня шума увеличивает отклонение восстановленных амплитуд и фаз от исходных. Зелёные маркеры на Рис. 1б соответствуют пучкам, представленным на Рис.2.

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. 2б). Также на Рис. 2в. представлен плохо восстановленный пучок, соответствующий уровню шума 29%.

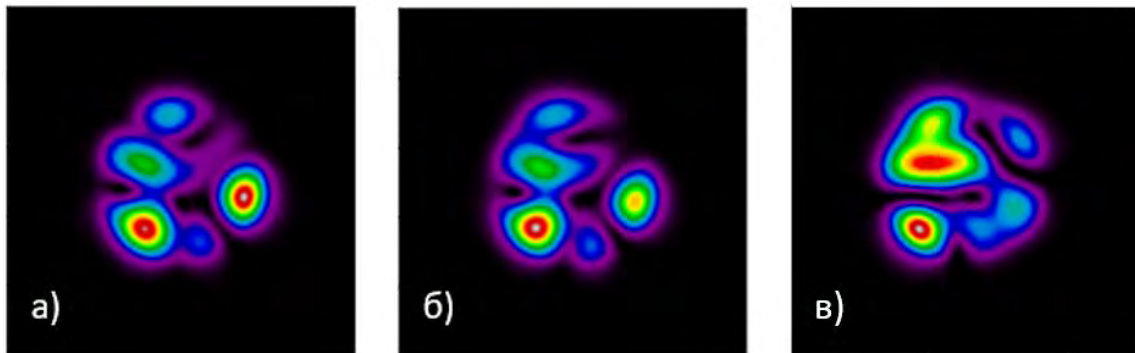


Рис. 2. Восстановленные пучки для уровня шума, а) 0%, б) 7%, в) 29%

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.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ (№17-72-30006-П).

Литература

1. K.Krupa, A.Tonello, et al. *Nat. Photonics* 11, 237-241 (2017)
2. E.A.Zlobina et al, *Opt. Express* 25, 12581 (2017)
3. M.A.Eftekhar et al., *Opt. Express*, 25, 9078 (2017)
4. D.Flamm et al. *Opt. Letters* 37, 2478 (2012)
5. M.D.Gervaziev et al., *Laser Phys. Lett.*, 18, 015101 (2021)
6. Mangini F. et al. *Opt. Express* 30, 10850-10865 (2022)