

# Синтез компьютерных голограмм для структурирования излучения при заведении в многосердцевинные оптические волокна

А. А. Ревякин<sup>1,2</sup>, М. Д. Гервазиев<sup>1,2</sup>, Д. С. Харенко<sup>1,2</sup>, Н. В. Бочкарев<sup>1,2</sup>, Н. А. Коляда<sup>1,2,3</sup>,  
С. А. Бабин<sup>1,2</sup>

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

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

<sup>3</sup> Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

В работе представлен сравнительный анализ методов синтеза фазовых компьютерных голограмм в контексте задачи заведения излучения в многосердцевинные оптические волокна. Задача заведения подразумевает контроль параметров излучения на входе в каждую из сердцевин волокна без значительной потери мощности светового потока. Это может быть актуально для исследования эффектов временного сжатия и когерентного объединения импульсов, возникновение которых в многосердцевинных оптических волокнах предсказано численно. Рассмотрены методы синтеза компьютерных голограмм на основе метода двойных фаз, алгоритма Гершберга-Сакстона и алгоритма Гершберга-Сакстона с весами. Приведены погрешности воспроизведения заданных параметров излучения и эффективность для заведения при различных конфигурациях параметров излучения.

*Ключевые слова:* Фазовые компьютерные голограммы, Многосердцевинные оптические волокна, Алгоритм Гершберга-Сакстона, Метод двойных фаз.

*Цитирование:* Ревякин, А. А. Синтез компьютерных голограмм для структурирования излучения при заведении в многосердцевинные оптические волокна / А. А. Ревякин, М. Д. Гервазиев, Д. С. Харенко, Н. В. Бочкарев, Н. А. Коляда, С. А. Бабин // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 99–102.

## Введение

В настоящее время компьютерная голография получила широкое применение в различных областях прикладной и научной деятельности, таких как модовая декомпозиция [1], структурирование лазерных импульсов [2], создание массивов оптических ловушек [3] и других. Мы считаем, что использование компьютерных голограмм, полученных существующими методами, может обеспечить проведение экспериментов по исследованию численно предсказанных эффектов [4], возникающих в многосердцевинных оптических волокнах, для которых необходим ввод излучения большой мощности в каждую сердцевину. В контексте задачи контролируемого ввода излучения в сердцевину оптического волокна в работе был проведен сравнительный анализ трех рассмотренных далее методов генерации компьютерных голограмм.

## 1. Исследуемые методы

В работе проведен сравнительный анализ следующих методов: алгоритм Гершберга-Сакстона [5] (Gerchberg-Saxton, GS), алгоритм Гершберга-Сакстона с весами [6] (weighted

Gerchberg-Saxton, WGS), метод двойных фаз [7] (double-phase holograms, DPH). Модификация фазы поля происходит при отражении от экрана пространственного фазового модулятора света (spatial light modulator, SLM).

Хорошо известный алгоритм GS позволяет итеративно подобрать фазу поля в передней фокальной плоскости линзы, зная амплитуду поля в задней фокальной плоскости. Однако данный алгоритм требует большого числа итераций и подвержен попаданию в локальные минимумы функции ошибки.

В алгоритме WGS предполагается, что угловой спектр поля, отраженного от экрана SLM, является набором небольшого числа узких пиков с одинаковыми амплитудами. Это предположение приводит к тому, что голограмма в данном случае задается набором весовых коэффициентов и фазовых сдвигов, сводя к минимуму количество варьируемых параметров, в отличие от GS, где это количество соответствует числу пикселей экрана SLM. Корректировка этих коэффициентов в результате итераций алгоритма приводит к установлению оптимальных значений коэффициентов, отвечающих максимуму дифракционной эффективности. Кроме того, в данной работе алгоритм дополнительно модифицирован, что позволяет изменять амплитуды пиков.

Метод DPH основан на объединении пикселей экрана SLM в макропиксели (в данной работе с размером  $2 \times 2$  пикселя), что позволяет имитировать амплитудно-фазовую модуляцию. Это приводит к получению голограммы без итераций, однако возникает сильная дифракция, приводящая к потере полезной мощности.

## 2. Установка

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Лазерный пучок (длина волны 1050 нм) коллимируется и расширяется с помощью системы линз L1, L2 до подходящего диаметра (около 8 мм), чтобы задействовать наибольшую площадь экрана SLM. Излучение, отраженное от экрана SLM (Meadowlark 1920 XY Series), проходит через фурье-линзу L3 и фокусируется на матрице камеры (Beamage-4M). Голограммы  $\phi$  генерируются на ПК и записываются на SLM. Соответствующие им распределения интенсивности  $|U_f|^2$  фиксируются камерой и сохраняются для последующей обработки.

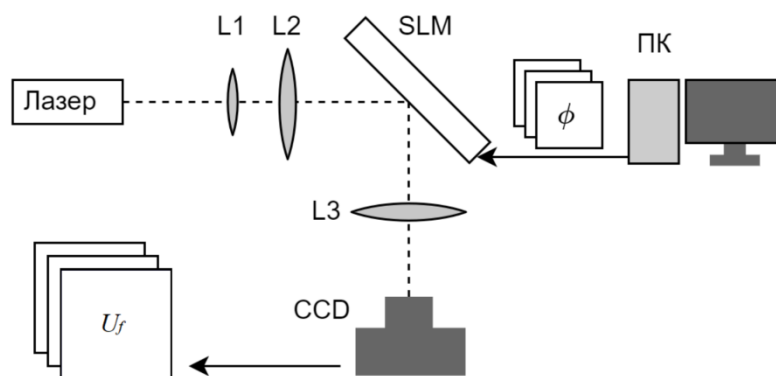
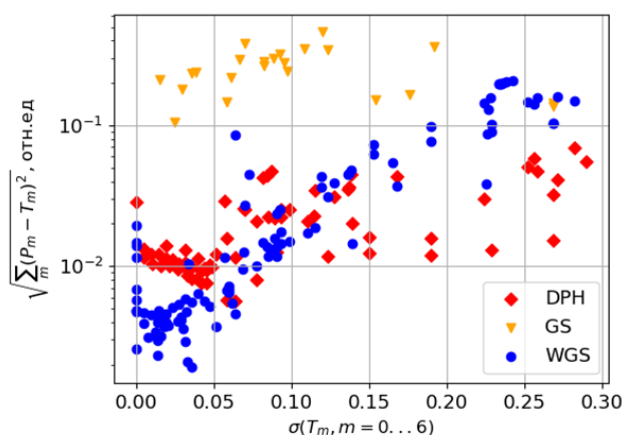


Рис. 1. Схема установки

При генерации голограмм в качестве параметров используются мощности, попадающие в сердцевину волокна. Они задаются как доли от общей мощности лазерного пучка: целевые  $T_m$  и измеренные экспериментально  $P_m$ .

### 3. Результаты

Для того чтобы сравнить методы по точности, был построен график зависимости квадратичной ошибки от стандартного отклонения  $\sigma$  набора  $T_m$  (рис. 2). Стандартное отклонение  $\sigma(T_m)$  введено, чтобы характеризовать разброс значений целевой мощности. Из рис. 2 видно, что ошибка алгоритма GS на порядок больше ошибки алгоритма WGS при малом разбросе целевых мощностей, а также на порядок больше, чем ошибка метода DPH. Метод WGS имеет меньшую ошибку при малом разбросе целевых мощностей, DPH – при большом разбросе целевых мощностей. Кроме точности воспроизведения целевых мощностей, необходимо сохранить как можно большую долю излучения в полезном сигнале, так как возникающие в многосердцевинных оптических волокнах эффекты являются нелинейными. За полезную мощность была принята мощность того излучения, которое сформировало заданное распределение интенсивности в фокальной плоскости фурие-линзы. Для рассмотренных методов отношение полезной мощности к исходной составило  $90 \pm 3 \%$  для алгоритма GS,  $90 \pm 6 \%$  для алгоритма WGS и  $35 \pm 2 \%$  для метода DPH.



**Рис. 2.** Сравнение методов. Степень соответствия реальных  $P_m$  и заданных  $T_m$  в алгоритме мощностей, определенная как квадратичная ошибка в зависимости от разброса значений в целевом наборе интенсивностей.

### Заключение

Продемонстрирована возможность использования компьютерных фазовых голограмм для заведения излучения с контролем его параметров в многосердцевинное оптическое волокно. Из сравнения алгоритмов GS и WGS следует необходимость перехода в данной задаче к алгоритмам с минимальным числом степеней свободы, таким как весовые коэффициенты и фазовые сдвиги в методе WGS. Кроме этого, так как задача заведения излучения в сердцевину волокна не подразумевает контроль параметров излучения во всей фокальной плоскости

фурье-линзы, то возможно использование таких методов как ДРН, где происходит контроль углового спектра поля только при малых отклонениях от оптической оси. Однако нужно учитывать, что в этом случае достижение большого отношения сигнал-шум происходит за счет сильных потерь, связанных с дифракцией.

### Благодарность

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

### Список источников

- [1] **Flamm D.** Mode analysis with a spatial light modulator as a correlation filter / D. Flamm, D. Naidoo, C. Schulze // *Optics letters*. — 2012. — Vol. 37, № 13. — P. 2478–2480.
- [2] **Weiner A. M.** Femtosecond pulse shaping using spatial light modulators // *Review of scientific instruments*. — 2000. — Vol. 71, № 5. — P. 1929–1960.
- [3] **Polin M.** Optimized holographic optical traps / M. Polin, K. Ladavac, S. Lee. // *Optics Express*. — 2005. — Vol. 13, № 15. — P. 5831–5845.
- [4] **Rubenchik A.** Nonlinear pulse combining and pulse compression in multi-core fibers / A. Rubenchik, I. Chekhovskoy, M. Fedoruk // *Optics letters*. — 2015. — Vol. 40, № 5. — P. 721–724.
- [5] **Gerchberg R.** Super-resolution through error energy reduction // *Optica Acta: International Journal of Optics*. — 1974. — Vol. 21, № 9. — P. 709–720.
- [6] **Di Leonardo R.** Computer generation of optimal holograms for optical trap arrays / R. Di Leonardo, F. Ianni, G. Ruocco // *Optics Express*. — 2007. — Vol. 15, № 4. — P. 1913–1922.
- [7] **Hsueh C.** Computer-generated double-phase holograms / C. Hsueh, A. Sawchuk // *Applied optics*. — 1978. — Vol. 17, № 24. — P. 3874–3883.

## Computer-generated holograms for structuring of beams inserted into multicore optical fibers

*A. A. Revyakin<sup>1,2</sup>, M. D. Gervaziev<sup>1,2</sup>, D. S. Kharenko<sup>1,2</sup>, N. V. Bochkarev<sup>1,2</sup>, N. A. Kolyada<sup>1,2,3</sup>, S. A. Babin<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup> Institute of Automation and Electrometry of the SB RAS, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

<sup>3</sup> Institute of Laser Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

The paper presents a comparative analysis of only-phase computer generated holograms (CGH) computation methods to solve a problem of inputting radiation into multi-core optical fibers. The problem is to control the radiation parameters at the entrance to each fiber core without significant luminous flux power loss. This may be relevant for studying the effects of temporal compression and coherent laser pulses combining, that are predicted numerically. CGH generating methods based on the double-phase holograms, the Gerchberg-Saxton and the weighted Gerchberg-Saxton algorithms are considered. The specified radiation parameters reproduction errors and the inputting efficiency for different radiation parameters configurations are given.

Keywords: Only-phase computer generated holograms, Multi-core optical fibers, Gerchberg-Saxton algorithm, Double-phase holograms.