

## ОТЧЕТ О ПРОДЕЛАННОЙ РАБОТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ ИВЦ НГУ

**Организация:** Новосибирский Государственный Университет, лаборатория нелинейной фотоники.

**Руководитель:** Турицин Сергей Константинович, заведующий лабораторией ЛНФ НГУ, кандидат физ.-мат. наук.

### **Состав коллектива:**

Кохановский Алексей Юрьевич, младший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук.

Куприков Евгений Александрович, младший научный сотрудник.

**Название работы:** «Проектирование волоконного лазера с нелинейным петлевым зеркалом с помощью алгоритма роя частиц»

**Постановка задачи:** Применить алгоритм роя частиц для определения параметров элементов волоконного лазерного резонатора, обеспечивающих генерацию импульсного излучения с заранее заданными параметрами.

**Состояние:** Волоконные импульсные лазеры с синхронизацией мод представляют собой сложные нелинейные системы, обладающие обширным пространством рабочих состояний, доступ к которым можно получить посредством управления параметрами резонатора. Интерес представляет поиск местонахождения режимов с определёнными свойствами (например, короткая продолжительность или высокая энергия импульса) в этом пространстве состояний. Задача поиска таких режимов является многопараметрической задачей глобальной оптимизации. В то время как в работах [3-4] предлагаются способы оптимизации параметров, которые можно варьировать в ходе эксперимента, такие параметры, как длины пассивных и активных волокон, коэффициенты деления волоконных разветвителей или топология резонатора, определяют архитектуру лазера и не могут изменяться в ходе эксперимента. Принимая во внимание высокую размерность пространства решений, оптимизацию этих параметров предлагается производить посредством методов машинного обучения с использованием численной модели волоконного лазера с последующей экспериментальной реализацией для проверки результатов моделирования. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (Грант № 17-72- 30006).

[1] Aguegaray C. et al. Mode-locked femtosecond all-normal all-PM Yb-doped fiber laser using a nonlinear amplifying loop mirror //Optics express. – 2012. – Т. 20. – №. 10. – С. 10545-10551.

[2] Bowen P. et al. Mode-locked femtosecond all-normal all-PM Yb-doped fiber laser at 1060 nm //Optics Communications. – 2016. – Т. 364. – С. 181-184.

[3] Woodward R. I., Kelleher E. J. R. Towards ‘smart lasers’: self-optimisation of an ultrafast pulse source using a genetic algorithm //Scientific reports. – 2016. – Т. 6. – С. 37616.

[4] Baumeister T., Brunton S. L., Kutz J. N. Deep learning and model predictive control for self-tuning modelocked lasers //JOSA B. – 2018. – Т. 35. – №. 3. – С. 617-626.

## ПОДРОБНОЕ ОПИСАНИЕ РАБОТЫ, ВКЛЮЧАЯ ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ АЛГОРИТМЫ

### **Численная модель лазерного резонатора**

Численная схема модели лазерного резонатора с нелинейным петлевым зеркалом представлена на Рис. 1.



Рис. 1: Принципиальная схема волоконного лазерного резонатора с петлевым усиливающим зеркалом с двумя участками усиления.

Численное моделирование распространения излучения в лазерном резонаторе проводилось на основе обобщенного нелинейного уравнения Шредингера(1).

$$\frac{\partial A}{\partial z} = i\gamma|A|^2A - \frac{i}{2}\beta_2 \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{g_0/2}{1+E/E_{sat}} A, \quad (1)$$

где  $A(z,t)$  – огибающая оптического поля,  $z$  – пространственная координата распространения, которая направлена вдоль оптического волновода,  $t$  – время,  $\gamma$  – коэффициент нелинейности волокна,  $\beta_2$  – коэффициент дисперсии волокна,  $g_0$  – коэффициент усиления,  $E_{sat}$  – энергия насыщения,  $E = \int |A|^2 dt$

В качестве переменных параметров использовались  $E_{sat1}$  и  $E_{sat2}$  (энергии насыщения усиливающих волокон в однонаправленной петле и петлевом зеркале соответственно),  $L_1$  и  $L_2$  (длины пассивного волокна внутри первой и второй петель соответственно) и  $\Delta S$  (полоса пропускания спектрального фильтра),  $\alpha$  (коэффициент выходного ответвителя).

### Алгоритм роя частиц

Решение обратной задачи проектирования лазерного резонатора производилось при помощи алгоритма оптимизации роя частиц (ОРЧ). Алгоритм начинается со случайной инициализации роя, состоящего из  $N$  частиц, которые имеют свои позиции и скорости. Под позицией частицы подразумевается вектор параметров лазерного резонатора, а скорость определяет изменение этого вектора на следующем шаге алгоритма. Для каждой частицы мы моделируем формирование импульса с помощью численной модели лазера. Затем частицы оцениваются с помощью функции целевой функции, чтобы оценить их близость к желаемому импульсу. Скорости и положения частиц находятся на каждом шаге по следующей формуле:

$$v_{t+1} = \omega v_t + \varphi_1 \beta_1 (p_t - x_t) + \varphi_2 \beta_2 (p_g - x_t) \quad (2)$$

$$x_{t+1} = x_t + v_{t+1} \quad (3),$$

где  $\omega$  – инерция частиц, константы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  определяют баланс между влиянием знаний отдельного агента и всей группы,  $\beta_1$  и  $\beta_2$  – это случайные числа, определяемые в пределах от 0 до  $\beta_{max}$ , где  $\beta_{max}$  является параметром алгоритма,  $pi$  и  $pg$  – предыдущая лучшая позиция агента и предыдущая лучшая позиция всей группы,  $v_i$  и  $x_i$  – текущие скорость и позиция в рассматриваемом пространстве. На каждом шаге алгоритма позиции частиц обновляются, и алгоритм повторяется до тех пор, пока функция ценности не достигнет целевого порогового значения или пока изменение функции не остановится.

В данной работе использовались следующие примёрты алгоритма: размер роя  $N = 50$  частицами,  $\varphi_1 = 2$ ,  $\varphi_2 = 2.1$ ,  $\omega = 0.4$ . Эти значения обеспечивали скорость схождения целевой функции и избегали привязки к ее локальному экстремальному значению.

Целевая-функция предназначена для определения желаемых выходных импульсов. В этом данной работе использовалась следующая функция

$$f(\Delta T, \Delta \lambda) = \alpha_1 \frac{|\Delta T - \Delta T_{target}|}{T_{max}} + \alpha_2 \frac{|\Delta \lambda - \Delta \lambda_{target}|}{\lambda_{max}}, \quad (4)$$

где  $\Delta T$  и  $\Delta \lambda$  – полуширина на полувысоте временного и спектрального распределений текущей частицы,  $\Delta T_{target}$  и  $\Delta \lambda_{target}$  - желаемые значения,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  - временные и спектральные веса,  $T_{max}$  и  $\lambda_{max}$  - ширина временного и спектрального окон численной модели.

## Результаты

Для демонстрации возможностей алгоритма роя частиц были рассмотрены различные наборы параметров импульса: спектральная полоса пропускания в интервале от 0,1 до 20 нм и временная длительность в интервале от 1 до 100 пс. Некоторые результаты представлена на Рис. 2.

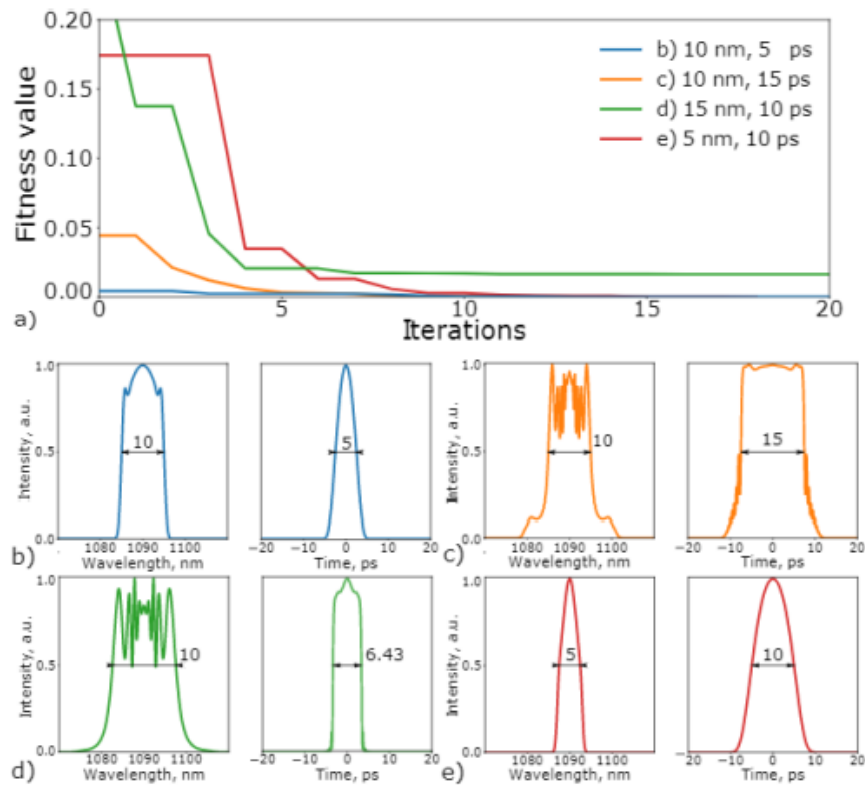


Рис. 2: а) Графики сходимости целевой функции для различных целевых параметров выходного импульса. б-д) Примеры спектрального и временного профиля солитонов.

На рисунке 2а показано, что алгоритму требуется относительно небольшое количество итераций (15) для достижения желаемых параметров выходного импульса. Однако зеленая линия также демонстрирует что у данного метода имеются ограничения. В этом случае значение целевой функции останавливается на относительно высоком уровне и остается неизменным на протяжении большого количества итераций, как показано зеленой линией на рис. 1.3а. Случай под буквой d иллюстрирует наличие ограничений на желаемые параметры импульса. В процессе работы алгоритма сохранялись все промежуточные решения. Была собрана база данных параметров генерируемых импульсов. Сводка решений показана на рис. 3. Каждая точка на этом графике соответствует определенному выходу лазера с заданной шириной полосы и шириной импульса.

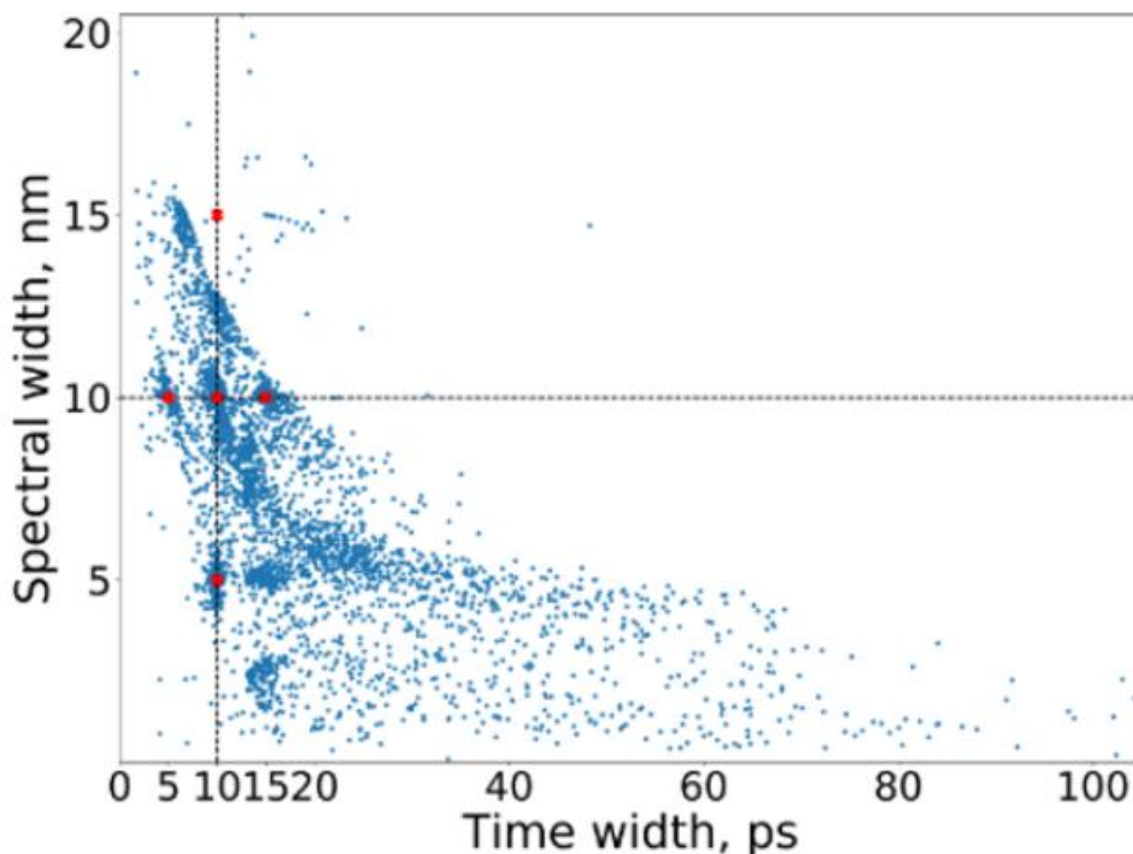


Рис. 3: Визуализация полученных устойчивых режимов. Красные крестики обозначают целевые параметры, которые были установлены для алгоритма роя частиц.

#### **Эффект от использования кластера в достижении целей работы:**

Кластер позволял проводить одновременный расчет большого количества волоконных лазерных резонаторов. Данная работа не была бы выполнена в отсутствие возможности использовать вычислительный кластер, учитывая необходимое количество данных для эффективной работы алгоритма роя частиц.

#### **Перечень публикаций, содержащих результаты работы**

1. Kokhanovskiy A. et al. Inverse design of mode-locked fiber laser by particle swarm optimization algorithm //Scientific Reports. – 2021. – Т. 11. – №. 1. – С. 1-9. DOI: 10.1038/s41598-021- 92996-1 2.

2. Kokhanovskiy A. et al. Designing of a fiber mode-locked laser cavity by stochastic optimization algorithm //2020 International Conference Laser Optics (ICLO). – IEEE, 2020. – C. 1-1. DOI: 10.1109/ICLO48556.2020.9285746