

## ОТЧЕТ О ПРОДЕЛАННОЙ РАБОТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ ИВЦ НГУ

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

**Руководитель:** Федорук Михаил Петрович, ректор НГУ, заведующий лабораторией, профессор, доктор физ.-мат. наук.

### Состав коллектива:

Куприков Евгений Александрович, младший научный сотрудник. Аспирант ИАиЭ СО РАН, направление 02.06.01 Компьютерные и информационные науки. Специальность 05.13.18 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Научный руководитель: Михаил Петрович Федору, д-р физ.-мат. наук, академик РАН, mifester@gmail.com.

Кохановский Алексей Юрьевич, канд. физ.-мат. наук.

**Название работы:** «Применение методов машинного обучения для поиска оптимальной архитектуры волоконного лазерного резонатора типа 8-ка»

**Постановка задачи:** Применяя методы стохастической оптимизации к численной модели лазерного резонатора, оптимизировать параметры волоконного лазера типа 8-ка с двумя диодами накачки [1-2]. Оптимизация подразумевает определение таких параметров, обеспечивающих генерацию импульсов с наибольшей мощностью, с наименьшей длительностью или с наибольшим линейным чирпом.

**Состояние:** Волоконные импульсные лазеры с короткими длительностями импульса представляют собой сложные динамические 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] Aguergaray 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 mode-locked lasers //JOSA B. – 2018. – Т. 35. – №. 3. – С. 617-626.

## Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы.

### Модель лазерного резонатора

Схема модели лазерного резонатора представлена на рис. 1.

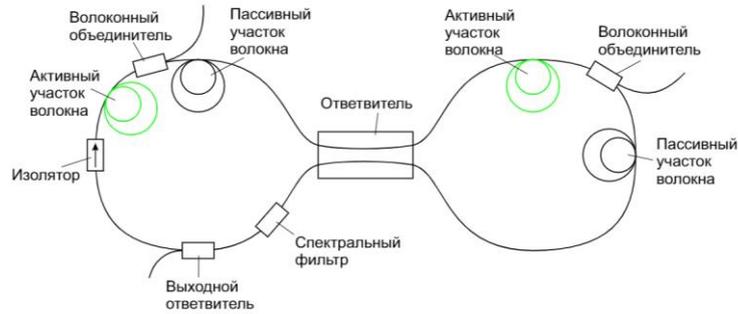


Рис. 1: Схема волоконного лазерного резонатора в форме 8-ки с двумя участками усиления.

Численное моделирование эволюции света внутри резонатора проводилось с использованием обобщенного нелинейного уравнения Шредингера на плавно изменяющуюся огибающую в резонаторе, который изображен на рис. 1.

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

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,  $E = \int |A|^2 dt$ .

Численное решение проводилось с применением метода расщепления по физическим процессам. Обсчет резонатора проходил до тех пор, пока распределение энергии в импульсе на одном и том же участке лазерного резонатора не переставало изменяться от обхода резонатора.

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 супергауссовского спектрального фильтра 6-ого порядка),  $\alpha$  (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:

$$v_{t+1} = \omega v_i + \varphi_1 \beta_1 (p_i - x_i) + \varphi_2 \beta_2 (p_g - x_i) \quad (2)$$

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

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,  $p_i$  и  $p_g$  – 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 ОРЧ 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.

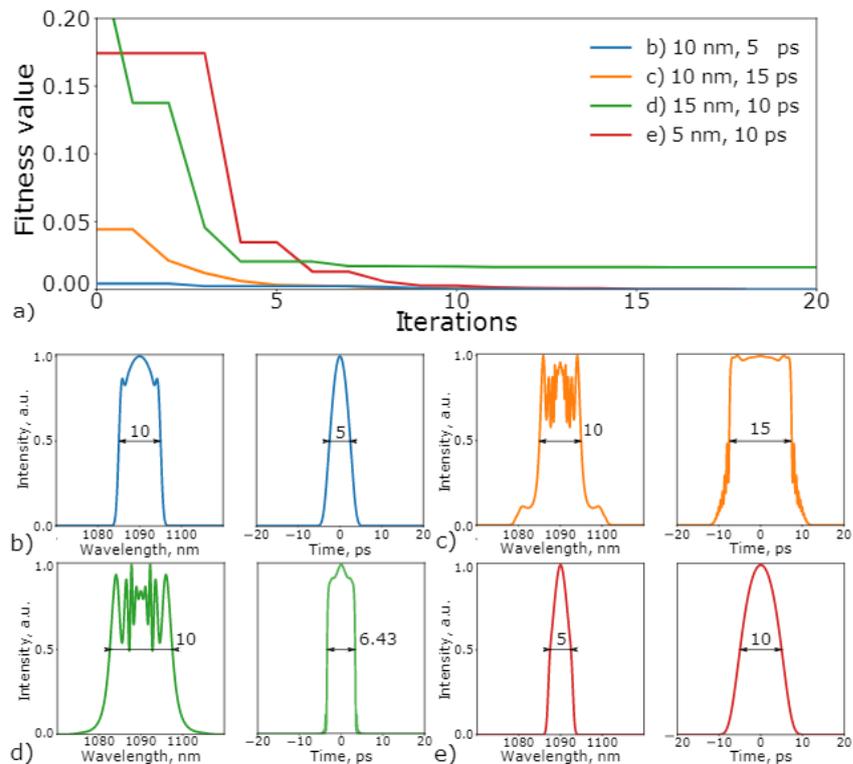


Рис. 2: а) Графики сходимости целевой функции для различных целевых параметров выходного импульса. б-д) Примеры спектрального и временного профиля солитонов.

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.

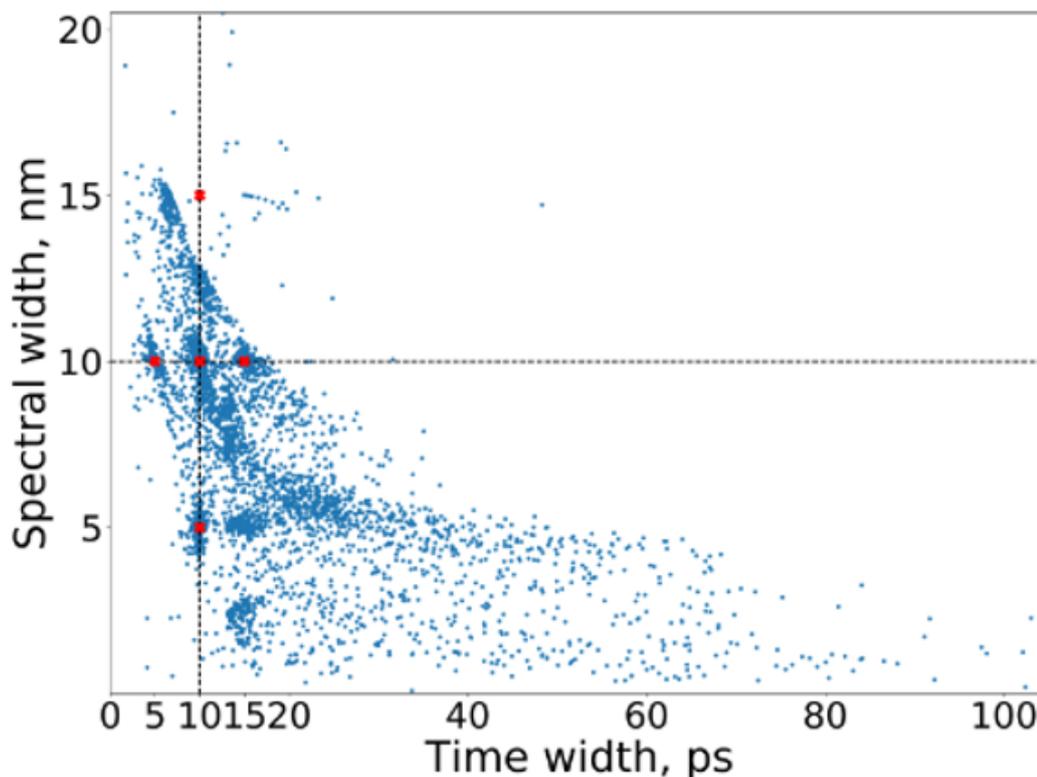


Рис. 3: Визуализация полученных устойчивых режимов. Красные крестики обозначают целевые параметры, которые были установлены для алгоритма ОРЧ.

Можно заметить, что правая верхняя часть графика, которая соответствует импульсам с относительно большой временной длительностью и спектральной шириной, пуста. Это ясно указывает на то, что вариативность импульсов ограничивается выбранными диапазонами переменных параметров резонатора. Для проверки этой гипотезы были зафиксировали несколько уровней энергии (1,2, 1,6 и 2,0 нДж) и выбрали импульсы с такими энергиями, имеющими наибольшее произведение времени на ширину полосы Рис 4. Следовательно, достижение более высокого значения произведения временной полосы требует увеличения энергии генерируемых импульсов.

Максимальная энергия генерируемых импульсов в основном определяется коэффициентом усиления усиливающих волокон. Расширение диапазонов энергий насыщения до 1 нДж позволило найти параметры лазерного резонатора для генерации импульсов длительностью 5 пс с шириной спектра 15 нм (см. Рис 5).

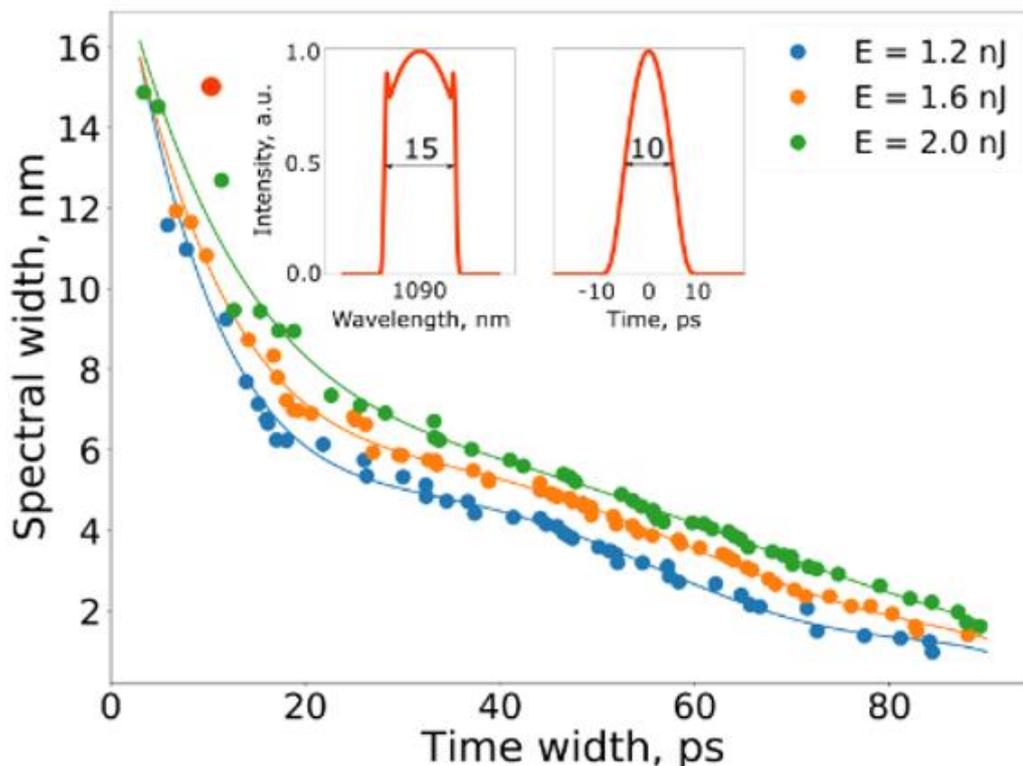


Рис. 4: Цветные точки соответствуют границам (в пространстве параметров) режимов, энергия которых не превышает 1,2 нДж (синие точки), 1,6 нДж (оранжевые точки) и 2,0 нДж (зеленые точки). На вставке показаны спектр и временной профиль, соответствующие красному кругу (ширина полосы 15 нм и ширина импульса 10 пс).

#### Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

Возможность использования большого количества процессорных ядер одновременно позволило существенно ускорить процесс решения задачи обратного проектирования. Если на кластере одна задача решалась за сутки, то для решения такой задачи на персональном компьютере потребовались бы недели расчетов.

#### 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](https://doi.org/10.1038/s41598-021-92996-1)
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. – С. 1-1. DOI: [10.1109/ICLO48556.2020.9285746](https://doi.org/10.1109/ICLO48556.2020.9285746)