

**Тема работы:** Оптимизации волоконного лазера с синхронизацией мод на основе эффекта нелинейного вращения поляризации с использованием генетического алгоритма

**Состав коллектива:**

Художиткова Дарья Алексеевна, НГУ, аспирант  
Федорук Михаил Петрович, НГУ, д.ф.-м.н., академик РАН  
Беднякова Анастасия Евгеньевна, НГУ, научный сотрудник ЛНФ

**Научное содержание работы:**

Постановка задачи.

В данной работе решалась задача поиска одноимпульсного режима генерации с максимальной энергией для волоконного лазера с синхронизацией мод на основе нелинейного вращения поляризации.

Современное состояние проблемы (на момент начала работы).

Волоконный лазер – сложная физическая многопараметрическая нелинейная система с большим числом оптимизационных параметров. Задача оптимизации волоконного лазера сложна и требует больших временных затрат при решении ее методом перебора, поэтому для решения такого рода задач часто используют оптимизационные алгоритмы, такие как генетический алгоритм [1-3] или алгоритм тороидального поиска[4]. Решение оптимизационной задачи является первым шагом на пути к построению «умного» самонастраивающегося лазера.

Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы.

Лазер представляет собой полностью волоконный кольцевой резонатор, обладающий нормальной суммарной дисперсией (рис.1). Такие лазеры способны генерировать диссипативные солитоны, обладающие высокой энергией и способные сжиматься во внешнем компрессоре до сотен фемтосекунд, что делает эти лазеры интересными как для науки, так и для практических приложений. Ранее этот лазер был исследован в работе [5], где описан эксперимент, проведено численное моделирование и оптимизация параметров: длин стандартного одномодового волокна, волокна, сохраняющего состояние поляризации и мощности накачки.

Для оптимизации такого лазера в работе были использованы генетический алгоритм и тороидальный поиск. Оптимизационные параметры: длина SMF ( $L_{SMF}$ ), длина DCF ( $L_{DCF}$ ) и мощность насыщения ( $P_{sat}$ )

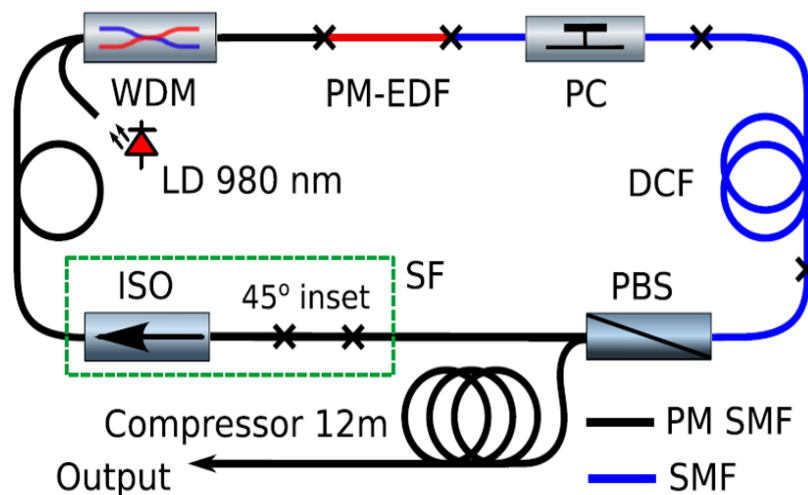


Рис.1. Схема волоконного лазера из работы [5]. SMF – стандартное одномодовое волокно, PM SMF – волокно, сохраняющее состояние поляризации, WDM – спектрально-селективный разветвитель, PBS – поляризационный разделитель пучков, PC – контроллер поляризации.

Поставленная задача решалась с помощью генетического алгоритма. Была выбрана функция приспособленности следующего вида:

$$f = EI,$$

где  $E$  – энергия сигнала,  $I = \begin{cases} 1, & \text{если режим одноимпульсный} \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$

Максимизация такой функции полностью соответствует решению поставленной задачи.

Для реализации алгоритма была использована библиотека GALib. Из нескольких моделей, предложенных библиотекой, была выбрана реализация алгоритма GASteadyStateGA, в которой используются перекрывающиеся популяции. Особенностью этого алгоритма является то, что формирование нового поколения происходит путем копирования предыдущего и добавления к нему нового временного поколения индивидуумов, затем удаляются наихудшие индивидуумы, чтобы вернуть поколение к первоначальному размеру.

Другой оптимизационный алгоритм, реализованный в данной работе, – тороидальный поиск. Суть метода заключается в том, чтобы преобразовать пространство оптимизационных параметров в тор. Преимуществом тороидального пространства параметров в том, что у него нет края, поэтому когда выбираются точки для расчетов, они могут попадать как в центр исследуемой области, так и сколь угодно близко к граничным значениям оптимизационных параметров.

Чтобы осуществить это преобразование нужно задать периодическое изменение оптимизационных параметров, например с помощью функции синуса. Частоты изменения параметров выбираются несоизмеримыми, чтобы не произошло закливание. Частоты были подобраны вручную так, чтобы пространство параметров покрывалось достаточно плотно.

$$L_{DCF} = 0.5a_{DCF} * \sin(\sqrt{31}t) + L_{DCF}^0$$

$$L_{PMF} = 0.5a_{PMF} * \sin(\sqrt{37}t) + L_{PMF}^0$$

$$P_{sat} = 0.5a_{sat} * \sin(\sqrt{43}t) + P_{sat}^0$$

здесь  $a_{DSF}$ ,  $a_{PMF}$ ,  $a_{sat}$  – амплитуды, с которыми изменяются  $L_{DSF}$ ,  $L_{PMF}$ ,  $P_{sat}$  соответственно.

Целевая функция выбрана как и в генетическом алгоритме.

Для вычисления целевой функции необходимо выполнить численное моделирование волоконного лазера: произвести расчеты до установления импульсной генерации или прервать вычисления при отсутствии таковой.

Распространение электромагнитного поля в волоконном световоде описывается обобщенным нелинейным уравнением Шредингера (ОНУШ).

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A}{\partial t^3} + i\gamma \left( 1 + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial t} \right) \left( A(z, t) \int_0^\infty R(t') |A(z, t - t')|^2 dt' \right)$$

где  $A(z, t)$  — медленно-меняющаяся огибающая электромагнитного поля,  $\beta_2$  и  $\beta_3$  — коэффициенты дисперсии второго и третьего порядков в окрестности несущей частоты  $\omega_0$ ,  $\gamma$  — коэффициент нелинейности.  $R(t) = (1 - f_R)\delta(t) + f_R h_R(t)$ .

Для численного решения обобщенного нелинейного уравнения Шредингера обычно применяют метод расщепления по физическим процессам с использованием быстрого преобразования Фурье на линейном шаге в симметричной форме. Нелинейный шаг выполняется методом Рунге-Кутты 2-го порядка.

После тестирования алгоритмов на описанной выше скалярной модели, для получения более полной картины была выполнена оптимизация волоконного лазера, описанного более точной гибридной моделью, которая учитывает состояние поляризации в DCF световоде.

Распространение электромагнитного поля в этом волокне описывается парой обобщенных нелинейных уравнений Шредингера для двух круговых компонент поляризации:

$$\frac{\partial E_{\pm}}{\partial z} = \left( i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3}{\partial t^3} - i\gamma(|E_+|^2 + |E_-|^2) \pm i \frac{\gamma}{3} (|E_+|^2 - |E_-|^2) \right) E_{\pm},$$

где  $E_+$  и  $E_-$  - левая и правая компоненты круговой поляризации.

В оптимизационную задачу были добавлены еще два параметра:  $\chi$ ,  $\psi$  – длины углы поворотов четверть- и полуволновой пластинок, которые описывают контролер поляризации.

#### Полученные результаты.

В работе были реализованы генетический алгоритм и алгоритм тороидального поиска для решения задачи поиска стационарного одноимпульсного режима генерации волоконного лазера с синхронизацией мод на основе нелинейного вращения поляризации для скалярной и гибридной математических моделей. Подобрана функция приспособленности, равная энергии, если в лазере установился одноимпульсный режим, и нулю в противном случае. Максимизация такой функции позволяет получить желаемый режим генерации. Так как вычисление такой функции требует много времени, была проведена модификация генетического алгоритма с целью уменьшить время расчетов. Во-первых, это параллельное вычисление приспособленности для особей в поколении. Во-вторых, были определены характеристики заведомо «плохих» режимов, что позволило прерывать вычисление и тем самым сократить время счета.

В результате проделанной работы удалось найти оптимальные параметры лазерного резонатора, для того чтобы в эксперименте получить одиночные импульсы с наибольшей энергией. Применение гибридной модели позволило найти набор параметров лазера, при которых энергию импульса удалось увеличить в 3 раза по сравнению с [5]. Результаты расчетов разными алгоритмами привели к одному режиму генерации и

## Иллюстрации, визуализация результатов.

На рисунке 2 показана сходимость генетического алгоритма (16 особей 20 поколений) и результат работы тороидального поиска. Можно заметить, что алгоритмы приводят к одному значению целевой функции.

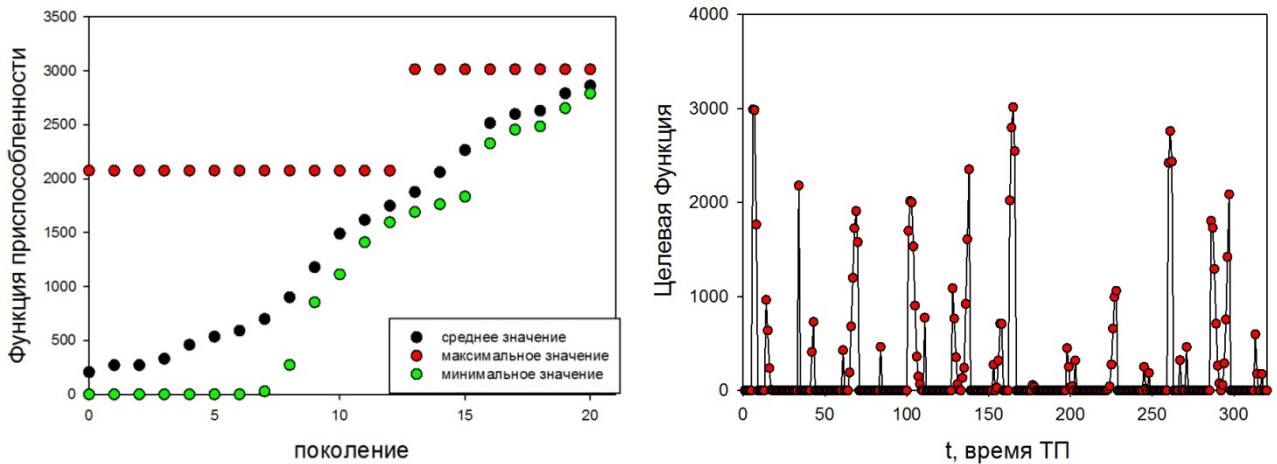


Рис. 2. Сходимость значений функции приспособленности к максимальному в генетическом алгоритме (слева). Результат работы тороидального поиска (справа).

На следующем рисунке сравнение импульсов и спектров после оптимизации генетическим алгоритмом и перебором из работы [5]. Благодаря использованию генетического алгоритма удалось увеличить энергию импульса  $\sim 15\%$  и значительно сократить время расчетов оптимизационной задачи.

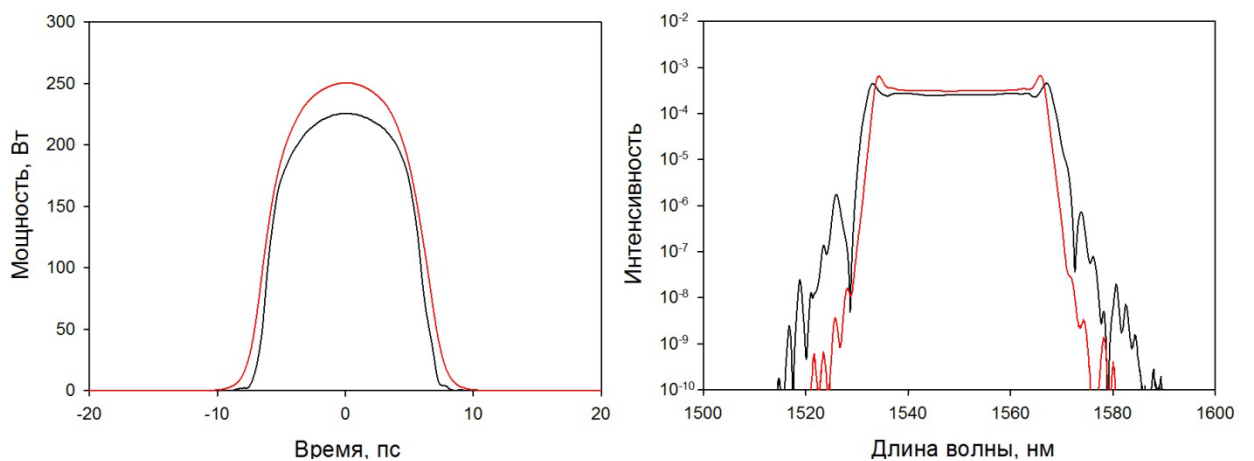


Рис.3. Сравнение найденного генетическим алгоритмом решения (красный) и решения, найденного перебором в [5] (черный). Слева временная форма, справа спектр сигнала.

Для оптимизации лазера гибридной моделью было увеличено число особей до 32 и число поколений до 40. Сходимость генетического алгоритма продемонстрирована на рисунке 4. Отметим, что алгоритм нашел другой режим генерации, энергия импульсов в котором выше в 3 раза по сравнению с режимом, найденным для скалярной модели. Рис

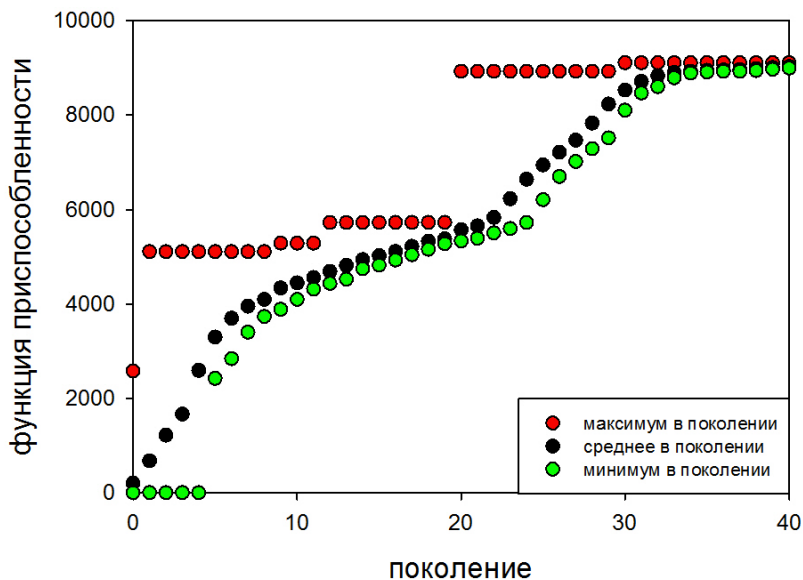


Рис. 4. Сходимость значений функции приспособленности к максимальному в генетическом алгоритме для гибридной модели.

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

Для осуществления целей работы были использованы вычислительные ресурсы ИВЦ НГУ. Так как волоконный лазер - сложная многопараметрическая система, для его оптимизации требуется достаточно много вычислительных ресурсов, недоступных на обычных ПК.

### Литература.

- [1] Fiber laser mode locked through an evolutionary algorithm U. Andral, R. Si Fodil, F. Amrani, F. Billard, E. Hertz, and P. Grelu, Optica 2 (2015)
- [2] Towards ‘smart lasers’: self-optimisation of an ultrafast pulse source using a genetic algorithm R. I. Woodward and E. J. R. Kelleher, Scientific Reports, 6, (2016)
- [3] High-energy mode-locked fiber lasers using multiple transmission filters and a genetic algorithm Fu X., Kutz J. N. Opt.Express (2013)
- [4] Intelligent Systems for Stabilizing Mode-Locked Lasers and Frequency Combs: Machine Learning and Equation-Free Control Paradigms for Self-Tuning Optics J. Nathan Kutz and Steven L. Brunton, Nanophotonics (2015)

[5] D. S. Kharenko, I. S. Zhdanov et al, Opt. Lett. 42, 3221-3224 (2017)

## Публикации:

### Статья

1. *Оптимизации волоконного лазера с синхронизацией мод на основе эффекта нелинейного вращения поляризации с использованием генетического алгоритма.* Д.А., **Художиткова.**, Новосибирск, 2020 г., Вычислительные Технологии, Т. 25.

### Тезисы

1. *Применение генетического алгоритма для оптимизации энергии импульсов в волоконном лазере.* Д.А., **Художиткова.** Новосибирск, 2018. Материалы 56-й Международной студенческой конференции. Математика. стр. 145.

2. *Оптимизация режимов генерации волоконных лазеров на основе генетического алгоритма.* **Художиткова, Д. и Беднякова, А.** Новосибирск, 2018. Материалы 8-го Российского семинара по волоконным лазерам.

3. *О сжатии импульсов в волоконном лазере.* Д.А., **Художиткова.** Новосибирск: Институт вычислительных технологий Сибирского отделения РАН, 2019. ТЕЗИСЫ XX ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ МОЛОДЫХ УЧЁНЫХ ПО МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ И ИНФОРМАЦИОННЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ. стр. 48-49.

4. *Designing of a fiber mode-locked laser cavity by stochastic optimization algorithm.* **Kokhanovskiy, A.; Kuprikov, E.; Popkov, I.; Bednyakova, A.; Khudozhitkova, D.; Smirnov, S.**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2020. Proceedings - International Conference Laser Optics 2020, ICLO 2020.

