

## ПРИМЕНЕНИЕ РЕКУРРЕНТНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ УЛЬТРАКОРОТКИХ ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ \*

✉ К. П. Сараева, А. Е. Беднякова

*Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия*

✉ k.saraeva@g.nsu.ru

Волоконные лазеры с ультракороткими импульсами имеют ряд практических преимуществ: компактность, эффективность, простота использования. Однако высокая пиковая мощность в волоконном лазерном резонаторе приводит к большому нелинейному набегу фазы и деградации качества импульса. Для повышения энергии импульсов применяются волоконные усилители, основанные на технике усиления chirпованных импульсов. В работе [1] был продемонстрирован новый режим усиления несимметричных импульсов с «управляемой нелинейностью», отличающийся динамически изменяющимся спектральным профилем усиления. Этот режим определяет генерацию импульса в симметричных плечах осциллятора Мамышева [2], позволяя получать рекордные пиковые мощности. Во время усиления импульс становится несимметричным, при этом мгновенная частота импульса близка к линейной, а ширина спектра значительно превосходит ширину полосы усиления. Для анализа данного режима усиления несимметричных импульсов с помощью численного моделирования требуется учитывать множество физических эффектов, влияющих на динамику импульса в активном световоде, таких как нелинейный эффект Керра, вынужденное комбинационное рассеяние и насыщение усиления на основе скоростных уравнений иттербия.

Однако такое моделирование является очень сложным и времязатратным, что существенно ограничивает возможности его применения в экспериментальных приложениях. Применение нейросетей в данной задаче позволяет устранить данное ограничение за счет значительного снижения количества численных операций. Другим преимуществом данного подхода по сравнению с классическим численным моделированием является возможность обобщения информации, что позволяет получать решения для неидеальных и зашумленных экспериментальных данных, когда точный учет всех факторов, определяющих ход эксперимента, невозможен. В большинстве работ, использующих методы глубокого обучения в задачах волоконной оптики, применяются архитектуры на основе линейных персептронов, которые не учитывают временной контекст и подходят только для задач классификации или предсказания выходного профиля импульса [3, 4]. Задача предсказания динамики распространения импульса по волокну схожа с задачей предсказания временных рядов, которая может быть решена с помощью применения рекуррентных нейронных сетей [5]. Рекуррентные нейронные сети имеют внутреннюю память, что позволяет им эффективно использовать предыдущие шаги эволюции для предсказания следующего.

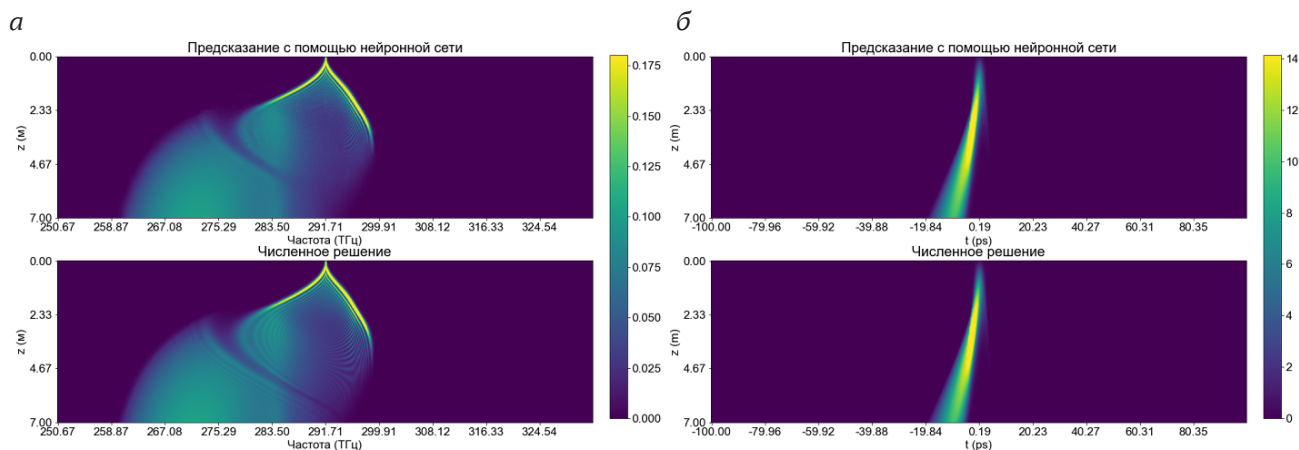
В данной работе мы представляем результаты применения рекуррентной физически информированной нейронной сети для предсказания нелинейной эволюции спектральной и временной интенсивности импульса вдоль активного световода. Показано, что нейросеть, обученная на ре-

---

\* Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 17-72-30006).

© К. П. Сараева, А. Е. Беднякова, 2023

зультатах численного моделирования, может успешно моделировать сложную динамику «нелинейного аттрактора» в волоконном усилителе с высокой точностью и скоростью. Нам удалось воспроизвести и улучшить результат, опубликованный в работе [4], используя более современную архитектуру и методы глубокого обучения. Отличительной особенностью нашей работы является то, что мы впервые применили методы глубокого обучения для предсказания нелинейного усиления с динамически изменяющимся профилем в активных световодах, в то время как все предыдущие работы ограничивались исследованием динамики в пассивных световодах.



Сравнение предсказания нейронной сети и численного моделирования.

Предсказание получено на 7 метрах по начальной эволюции на расстоянии 0,4 метра (с шагом вдоль  $z \sim 0,04$  м): эволюция спектральной (а) и временной (б) мощностей (отн. ед.) стартового гауссова импульса  $P_0 = 600$  Вт,  $T_0 = 25$  пс

Мы демонстрируем возможность предсказания эволюции интенсивности на расстояниях более 7 м в широкой области параметров входного импульса, как показано на рисунке. Относительная среднеквадратичная ошибка предсказания 140 профилей интенсивности на расстоянии 7 м составила менее 0,1 для данных, не участвующих в обучении. В работе также проведена оценка количества вычислительных операций и выигрыша по времени, полученном при использовании нейросети в сравнении с численным моделированием. Построены карты ошибок в области варьируемых параметров. Кроме того, исследована возможность предсказания эволюции по одному начальному профилю интенсивности, подаваемому на вход нейросети (*cold start*).

## Список литературы

1. Sidorenko P., Fu W., Wise F. Nonlinear ultrafast fiber amplifiers beyond the gain-narrowing limit // *Optica*. 2019. Vol. 6.10.
2. Chen Yi-Hao et al. Starting dynamics of a linear-cavity femtosecond Mamyshev oscillator // *JOSA B*. 2021. Vol. 38.3.
3. Boscolo S., Dudley J.M., Finot C. Modelling self-similar parabolic pulses in optical fibres with a neural network // *Results in Optics*. 2021. Vol. 3.
4. Stanfield M. et al. Real-time reconstruction of high energy, ultrafast laser pulses using deep learning // *Scientific reports*. 2022. Vol. 12.1.
5. Lauri S. et al. Predicting ultrafast nonlinear dynamics in fibre optics with a recurrent neural network // *Nature machine intelligence*. 2021. Vol. 3.4.