

ПРИМЕНЕНИЕ РЕКУРРЕНТНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ УЛЬТРАКОРОТКИХ ОПТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ

Сараева К.П. *, Беднякова А.Е.

*Новосибирский Государственный Университет, г. Новосибирск
E-mail: k.saraeva@g.nsu.ru DOI 10.24412/2308-6920-2023-6-437-438

Волоконные лазеры, генерирующие ультракороткие импульсы, обладают рядом практических преимуществ, среди которых компактность, высокая эффективность, относительная простота использования и обслуживания. Однако, достижение высокой пиковой мощности в волоконном лазерном резонаторе приводит к большому нелинейному набегу фазы и деградации качества импульса. Повышение энергии ультракоротких лазерных импульсов возможно благодаря применению волоконных усилителей, основанных, как правило, на технике усиления чирпованных импульсов. В недавних работах группы из Корнелльского университета [1] был продемонстрирован новый режим усиления несимметричных импульсов с «управляемой нелинейностью», отличающийся наличием динамически изменяющегося вдоль световода спектра усиления. Стоит отметить, что данный режим определяет эволюцию импульса в симметричных плечах осциллятора Мамышева [2], позволяя получить рекордные пиковые мощности. Во время усиления импульс испытывает сложную нелинейную динамику, становясь несимметричным, при этом мгновенная частота импульса близка к линейной, а ширина спектра превосходит ширину полосы усиления. С помощью математического моделирования усилителя была выдвинута гипотеза о том, что в основе сложной эволюции импульса лежит существование нелинейного аттрактора. Определяющую роль в формировании нелинейного аттрактора играет изменение профиля усиления, что накладывает обязательное условие на использование в численных расчётах сложной модели, учитывающей эволюцию усиления вдоль световода и его зависимость от длины волны.

Волоконный усилитель является наиболее ресурсоёмкой частью лазерной системы в задачах численного моделирования, что затрудняет его применение в экспериментальных приложениях, требующих проведения расчётов в реальном времени. Возможным решением данной проблемы является применение нейронных сетей для предсказания эволюции профиля интенсивности вдоль волокна [3-5]. Нейронные сети позволяют ускорить процесс моделирования за счет снижения количества вычислительных операций и обладают способностью к обобщению информации, что позволяет получать решения для неидеальных и зашумлённых экспериментальных данных, когда точный учет всех факторов, определяющих ход эксперимента, невозможен.

В большинстве работ, использующих методы глубокого обучения в задачах волоконной оптики, не используют современные архитектуры, повсеместно применяя линейные перцептроны, которые не учитывают временной контекст и подходят только для классификации и предсказания выходного профиля импульса [3, 4]. Задача предсказания динамики распространения импульса по волокну полностью эквивалентна задаче предсказания временных рядов, которая может быть решена с помощью применения рекуррентных нейронных сетей [5]. Рекуррентные нейронные сети обладают внутренней памятью, что позволяет им эффективно использовать предыдущие шаги эволюции для предсказания следующего шага.

В данной работе приведены результаты применения физически информированной рекуррентной нейронной сети для предсказания нелинейной эволюции спектральной и временной интенсивности импульса вдоль активного световода. Мы показываем, что обученная на результатах численного моделирования нейросеть может воспроизводить сложную динамику «нелинейного аттрактора» в волоконном усилителе с высокой точностью и скоростью. Нам удалось воспроизвести и улучшить результат, опубликованный в работе [4], используя усовершенствованную архитектуру и более современные методы глубокого обучения. Новизна нашей работы также состоит в том, что в отличие от всех существующих на текущий момент работ, использующих методы глубокого обучения для исследования динамики в пассивных световодах, нам удалось обучить нейросеть предсказывать нелинейное усиление с динамически изменяющимся профилем.

На первом этапе нами была реализована модель волоконного усилителя, представляющая собой систему связанных уравнений: обобщённого нелинейного уравнения Шредингера (НУШ) и скоростных уравнений иттербия. Модель позволяет исследовать распространение импульсов с учётом нелинейного эффекта Керра, вынужденного комбинационного рассеяния и насыщения усиления.

Численное интегрирование НУШ было выполнено с помощью метода расщепления по физическим процессам.

Далее была реализована рекуррентная нейронная сеть, принимающая на вход эволюционное окно, состоящее из нескольких последовательных профилей интенсивности вдоль волокна, выходом нейросети является предсказание профиля интенсивности следующем шаге (Рис. 1). С помощью применения метода авторегрессии может быть решена задача предсказания эволюции вдоль целого участка волокна по нескольким начальным импульсам.

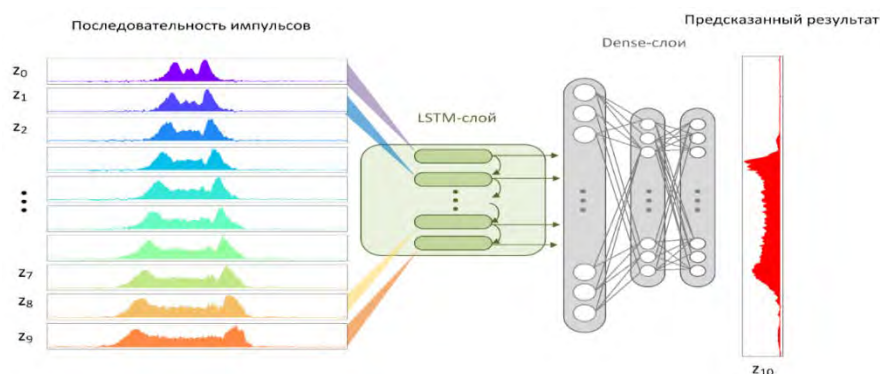


Рис.1. Схема рекуррентной нейронной сети

Обученная на результатах численного моделирования нейросеть в области параметров, соответствующих режиму нелинейного аттрактора, может воспроизводить нелинейную динамику в волоконном усилителе на расстояниях более чем 7 метров (Рис. 2).

Проведено сравнение предсказания нейросети с результатами численного моделирования на тестовых данных, которые не входили в обучающую выборку. Относительная среднеквадратичная ошибка предсказания одного шага для различных окон эволюции составила менее $2 \cdot 10^{-4}$, относительная среднеквадратичная ошибка предсказания 140 профилей интенсивности на расстояние 7 м составила менее 0.1. 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. Исследована возможность автозапуска эволюции (“cold start”), позволяющая сократить количество профилей интенсивности, подаваемых на вход нейросети, до одного. Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 17-72-30006).

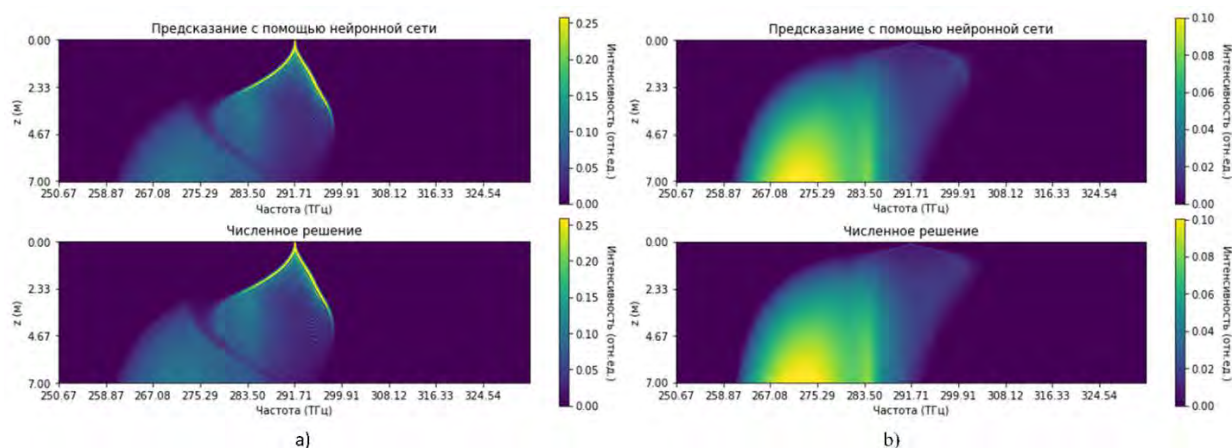


Рис.2. Сравнение предсказаний нейронной сети и численного моделирования на тестовых данных, не участвовавших в обучении. Предсказание получено на 7ми метрах по начальной эволюции на расстоянии 0.4 метра (с шагом вдоль $z \sim 0.04$ м): а – эволюция стартового гауссова импульса с параметрами $P_0=600$ Вт, $T = 3$ нс, б - $P_0=600$ Вт, $T = 0.3$ нс

Литература

1. Sidorenko P., Fu W., Wise F., *Optica* **6(10)**, 1328-1333 (2019)
2. Chen Y.H., et al, *JOSA B* **38(3)**, 743-748 (2021)
3. Boscolo S., Dudley J.M., Finot C., *Optics* **3**, 100066 (2021)
4. Stanfield M., et al, *Scientific reports*, **12(1)**, p.5299 (2022)
5. Salmela L., et al. *Nature machine intelligence* **3(4)**, 344-354 (2021)