

**Тема:** Компенсация нелинейных искажений в волоконно-оптических системах связи с поляризационным мультиплексированием на основе полносвязных нейронных сетей

### **Состав коллектива**

Богданов Степан Александрович, аспирант, м.н.с., ЛНФ НГУ

Сидельников Олег Сергеевич, к.ф.-м.н., с.н.с. ЛНФ НГУ

Редюк Алексей Александрович, к.ф.-м.н., н.с. ЛНФ НГУ

### **Аннотация**

В работе предложена схема компенсации нелинейных искажений в протяженных волоконно-оптических линиях связи с поляризационным уплотнением каналов, основанная на полносвязных нейронных сетях с комплекснозначной арифметикой. Функция активации разработанной схемы позволяет учитывать нелинейное взаимодействие сигналов с разных поляризационных компонент. Проведено сравнение с линейной схемой и нейронной сетью, которая обрабатывает сигналы с разных поляризаций независимо, и показано превосходство предложенной архитектуры нейронной сети.

### **Постановка задачи**

Работа направлена на создание методов обработки сигналов на приемнике линий связи, используя техники глубокого обучения. Для созданных методов проведен анализ эффективности снижения нелинейных искажений в линиях связи с поляризационным мультиплексированием каналов, а также оптимизированы характеристики нейронной сети.

### **Текущее состояние проблемы**

К настоящему моменту большое число работ посвящено исследованию методов обработки оптических сигналов, основанных на искусственных нейронных сетях (НС). Причем с этой целью используется большинство известных архитектур НС. Так, например, в работе [1] с помощью нейронных сетей моделируется метод обратного распространения сигнала (DBP, digital back-propagation), что позволяет добиться высокой эффективности компенсации нелинейных искажений. Дальнейшее развитие данного подхода было предложено в работе [2], где с помощью сверточных НС с комплекснозначной арифметикой моделировалось обратное распространение в системе связи со спектральным уплотнением каналов. За счет использования симметричных дисперсионных фильтров и улучшенной нелинейной функции активации такая схема позволяет значительно повысить качество передачи сигнала, обладая при этом невысокой вычислительной сложностью. В работе [3] демонстрируется схема обработки сигналов на приемнике линии связи, основанная на долгой краткосрочной памяти (LSTM, long short-term memory), разновидности рекуррентных НС. За счет особенностей архитектуры таких нейронных сетей получившиеся на их основе методы обладают низкой вычислительной сложностью. Наиболее популярной архитектурой НС, на основе которой разрабатываются различные схемы компенсации нелинейных искажений, являются полно-связные нейронные сети. Большое число работ посвящено обработке сигналов с помощью такой архитектуры НС в линиях связи с амплитудно-импульсной модуляцией [4, 5]. В работах [6, 7] с помощью полносвязных нейронных сетей компенсируется нелинейность в системах с 16-

позиционной квадратурно-амплитудной модуляцией. На основе такого типа НС предложены также схемы обработки OFDM-сигналов (orthogonal frequency-division multiplexing, мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов) [8]. Однако практически во всех рассмотренных работах архитектура таких сетей реализована с использованием действительных чисел.

- [1] Häger C. et al. Proc. Opt. Fiber Commun. Conf. (OFC) (San Diego, USA, 2018, p. W3A.4).
- [2] Sidelnikov O. et al. J. Lightwave Technol., 39, 2397 (2021).
- [3] Deligiannidis S. et al. J. Lightwave Technol., 38, 5991 (2020).
- [4] Luo M. et al. Proc. Opt. Fiber Commun. Conf. (OFC) (San Diego, USA, 2018, p. M2F.2).
- [5] Reza A.G. et al. IEEE Photon. Technol. Lett., 30, 1416 (2018).
- [6] Sidelnikov O. et al. Opt. Express, 26, 25 (2018).
- [7] Богданов С.А. и др, Квантовая электроника 51, 459 (2021).
- [8] Jarajreh M.A. et al. IEEE Photon. Technol. Lett., 27, 387 (2014).

## **Описание работы и полученные результаты**

Сигналы на приемниках волоконно-оптических линий связи как правило искажены вследствие действия дисперсионных и нелинейных эффектов. Более того существует ряд дополнительных факторов, которые также приводят к потере информации: наличие шумов, действие усилителей, несовершенство передающих и принимающих устройств. Учет всех этих фактор требует построения точных и сложных моделей ВОЛС, что в свою очередь повышает сложность обработки сигналов. Существенное улучшение может быть достигнуто благодаря технике компенсации накопленной дисперсии, что может быть эффективно реализовано с помощью быстрых алгоритмов преобразования Фурье. В то же время нелинейность является ключевым фактором, ограничивающим эффективности современных систем передачи данных. Высокая численная сложность, связанная с использованием точных моделей для компенсации нелинейности до сих пор является краеугольным камнем на пути повышении эффективности ВОЛС. Новые техники на основе нейронных сетей (НН) получили широкое распространение, в том числе и в методах обработки оптических сигналов. Таким образом, нейронные сети являются многообещающей техникой для компенсации нелинейности в ВОЛС. Более того, эффективность применение нейронных сетей может быть существенно улучшена, если будут учтены особенности решаемой физической задачи.

Распространение сигналов в оптическом волокне по двум поляризациям описывается системой уравнений Манакова. Предлагается схема компенсации нелинейности на основе полносвязных НН. Следующие особенности решаемой физической задачи могут быть использованы для увеличения эффективности подхода:

1. НН должна быть реализована на основе комплекснозначной арифметики, что соответствует комплексной природе оптического сигнала;
2. комплекснозначная реализация НН делает возможной применение специальной функций активации, соответствующей нелинейному шагу при решении системы уравнений Манакова методом расщепления по физическим процессам:

$$f(z_1) = e^{i(\gamma_1|z_1|^2 + \gamma_2|z_2|^2)z_1},$$

где  $z_1, z_2$  – значения, принимаемые функцией активации для первой и второй поляризации,  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  – некоторые оптимизируемые параметры;

3. на вход НН должна подаваться серия последовательных символов, для того чтобы учесть эффект памяти канала.

Одним из результатов работы является сравнение эффективности компенсации нелинейных искажений на приемнике ВОЛС с поляризационным уплотнением каналов для следующих методов: комплекснозначная НН с описанной функцией активации, обрабатывающая обе поляризации вместе, НН, обрабатывающая поляризации независимо и линейная схема компенсации дисперсии без компенсации нелинейности. На рисунке 1 приведена зависимости BER (Bit Error Ratio) после применение всех трех схем на приемнике.

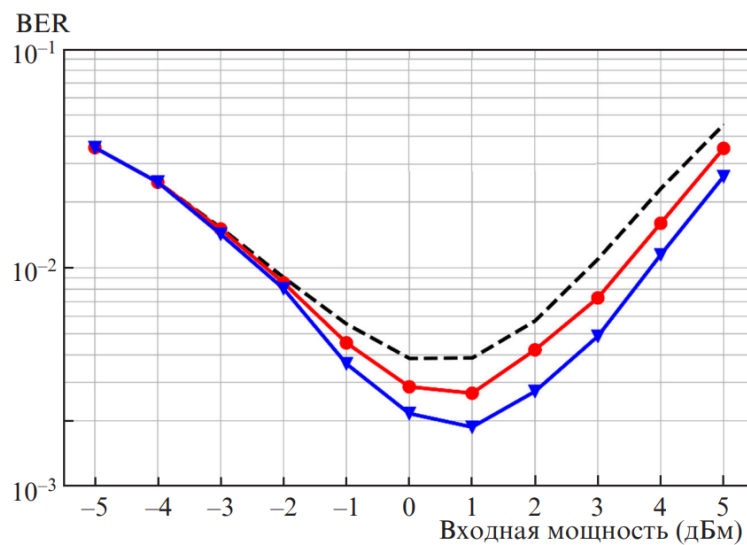


Рисунок 1. Зависимость BER от входной мощности НН, обрабатывающей обе поляризации вместе (синий), независимо (красный) и без применения схемы компенсации нелинейности (чёрный).

Нейронные сети показали свою эффективность при решении задачи компенсации нелинейности на приемнике ВОЛС, в разы уменьшив величину BER. Существенное увеличение их эффективности может быть достигнуто за счет учета особенностей конкретной физической задачи: комплексность оптического сигнала – комплексность нейронной сети, характер действия нелинейности – специальная функция активации, память канала – структура входного слоя нейронной сети.

### Эффект от использования кластера

Обучение и оптимизация архитектуры нейронных сетей были выполнены с использованием оборудования ИВЦ НГУ. Применение узлов с GPU значительно уменьшило время проведения расчетов.

### **Опубликованные работы:**

1. Bogdanov S. A., Sidelnikov O. S., Redyuk A. A. Application of complex fully connected neural networks to compensate for nonlinearity in fibre-optic communication lines with polarisation division multiplexing //Quantum Electronics. – 2021. – Т. 51. – №. 12. – С. 1076.
2. Bogdanov S. A., Sidelnikov O. S. Use of complex fully connected neural networks to compensate for nonlinear effects in fibre-optic communication lines //Quantum Electronics. – 2021. – Т. 51. – №. 5. – С. 459.
3. Bogdanov S., Sidelnikov O. Complex Fully Connected Neural Networks for Nonlinearity Compensation in Long-Haul Transmission Systems //The European Conference on Lasers and Electro-Optics. – Optical Society of America, 2021. – С. ci\_p\_7.
4. Bogdanov S. A. et al. Fully connected feed-forward neural network based nonlinearity compensation method for polarization multiplexed transmission systems //2020 International Conference Laser Optics (ICLO). – IEEE, 2020. – С. 1-1.
5. Богданов С. А. и др. Компенсация нелинейных искажений в системах с поляризационным мультиплексированием на основе полносвязных нейронных сетей //9-й Международный семинар по волоконным лазерам 2020. – 2020. – С. 124-125.
6. Богданов С. А., Сидельников О. С. Программный модуль для реализации линейного слоя и нелинейной функции активации полносвязных нейронных сетей с комплекснозначной арифметикой. – 2021.