

# Исследование работы приемника с нелинейным частотным мультиплексированием на основе нейронных сетей

Н.И. Поповский<sup>1</sup>, В.В. Давыдов<sup>2</sup>, В.Ю. Рудь<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия, 193232

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия, 195251

<sup>3</sup>ФТИ А.Ф. Иоффе, Политехническая 26, Санкт-Петербург, Россия, 194021

## Аннотация

Отмечено, что в системах связи с нелинейным частотным мультиплексированием (NFDM) быстрое улучшение их характеристик передачи, не решает в необходимом объеме проблемы, связанные с шумами и потерями в оптическом волокне. Предложена методика принятия решения, основанная на замене обычного приемника NFT (nonlinear Fourier transform) символьным решателем на основе нейронной сети. Это устройство обладает высокой адаптивностью, поскольку учится на ранее полученных импульсах и, таким образом, не имеет никаких предположений о системе и распределении шума. Разработанный метод принятия решения полностью применим во временной области и исключает нелинейное преобразование Фурье.

## Ключевые слова

Машинное обучение, глубокие нейронные сети, волоконно-оптические системы передачи, нелинейное частотное мультиплексирование, нелинейное Фурье преобразование

## 1. Введение

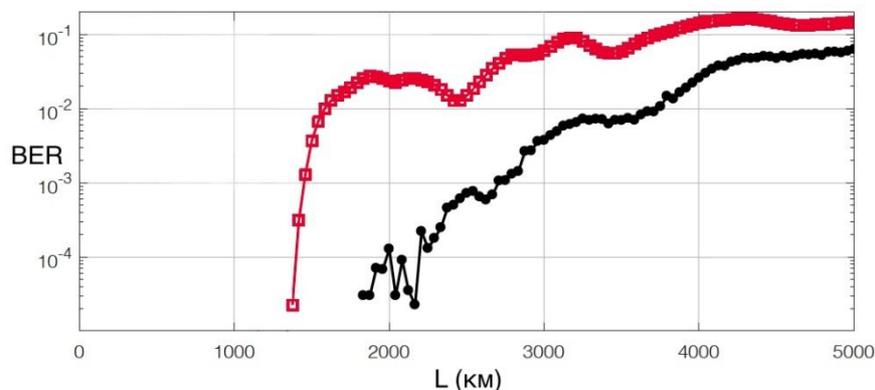
Развитие методов машинного обучения позволило исследователям расширить количество инструментов для оптимизации параметров компонентов волоконно-оптических систем передачи [1]. Глубокие нейронные сети дают возможность моделировать системы оптической связи, где приемник изучает характеристики искажений ранее переданных импульсов для предсказания в будущем. Результаты для систем с модуляцией по интенсивности со скоростью 42 Гбит/с показывают, что оптимизация приемников на основе таких нейронных сетей демонстрируют улучшение BER по сравнению с основанным на двух-и четырехуровневой импульсной амплитудной модуляции со стандартным выравниванием с прямой связью (FFE) в диапазоне 500 км [2].

## 2. Описания проведенного исследования

В данной статье анализируются две схемы обнаружения систем связи NFDM. Обе схемы применяются непосредственно во временной области с использованием в первом случае евклидова минимального расстояния, а во втором нейронной сети. Первый приемник после передачи на расстояние  $L$  обучается путем усреднения по множеству полученных экземпляров каждого из  $N$  индивидуальных солитонов. Эти средние значения используются в качестве эталона  $u_{ref}^{(n)}(t, L)$ ,  $n = 1..N$  для обнаружения будущих принятых солитонов. Для каждого принятого солитонного импульса  $u_k(t, L)$  вычисляется евклидово расстояние до всех эталонов и для декодирования выбирается эталонный импульс с минимальным расстоянием:

$$n_{opt}[k] = \operatorname{argmin} \left( \int_{-\infty}^{\infty} |u_k(t, L) - u_{ref}^{(n)}(t, L)|^2 dt \right), \quad (1)$$

Первый приемник не принимает во внимание распределение шума, в то время как второй на основе нейронных сетей изучает почти оптимальное распределение вероятностей принятых символов в процессе обучения. При частоте дискретизации  $R$  отсчетов на символ все принятые импульсы лежат в  $R$ -мерном комплексном пространстве. Таким образом, нейронная сеть изучает отображение из  $R$ -мерного комплексного пространства импульсов на решение по одному из  $N$  возможных передаваемых символов.



**Рисунок 1:** Зависимость BER от расстояния  $L$  для первого приемника (красный) и второго (черный)

Проведенные исследования показали, что частота дискретизации находится в прямой зависимости от количества входных слоев нейронной сети, которое должно быть как можно меньше для меньшей сложности. При этом частота дискретизации не должна противоречить теореме дискретизации, иначе информация будет потеряна. В отличие от типичных систем мультиплексирования с разделением по длине волны (WDM), полоса пропускания сигнала NFDM не имеет резкого ограничения полосы и ее снижение является компромиссом между предоставлением большего количества информации нейронной сети и сложностью его входного слоя.

### 3. Заключение

Установлено, что при гауссовом распределении накопленных искажений по каналу связи приемник на основе евклидова минимального расстояния является оптимальным и работает не хуже, чем приемник на основе нейронных сетей. В случае, если распределение не является гауссовым, проведенные эксперименты показывают следующее. Приемник, обученный на основе нейронных сетей моделировать распределение искажений, превосходит по своим характеристикам приемник на основе евклидова минимального расстояния и позволяет передавать сигнал на расстояние почти 3000 км с BER ниже  $10^{-3}$ .

### 4. Литература

- [1] Popovskiy, N.I. Features of the construction of fiber-optic communication lines with code division multiplexing / N.I. Popovskiy, V.V. Davydov, L.R. Valiullin // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1695(1). – P. 012120.
- [2] Karanov, B. End-to-end deep learning of optical fiber communications / B. Karanov, M. Chagnon, F. Thouin, T.A. Eriksson, H. Bulow, D. Lavery // J. Lightwave Technol. – 2018. – Vol. 36 (20). – P. 4843-4855.