



**МИСИС**  
УНИВЕРСИТЕТ



Кафедра  
инженерной  
кибернетики

# Разработка алгоритма Learned DBP для компенсации нелинейных искажений в ВОЛС

**Выполнил:** студент группы БПМ-22-ПО-1  
Голубев Иван Максимович

**Научный руководитель:** старший преподаватель, к.т.н,  
Семёнов Валерий Васильевич

Дата проведения: 24.01.2026

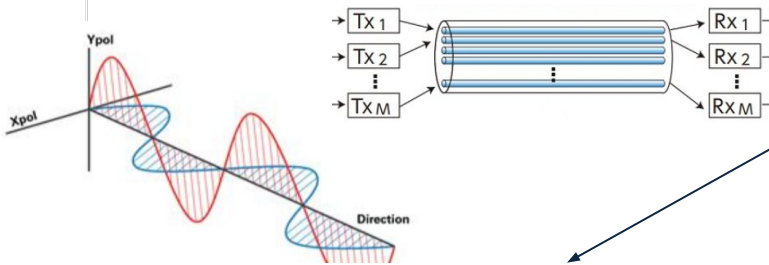


# Актуальность

$$C = M \cdot B \cdot \log_2(1 + S/N)$$

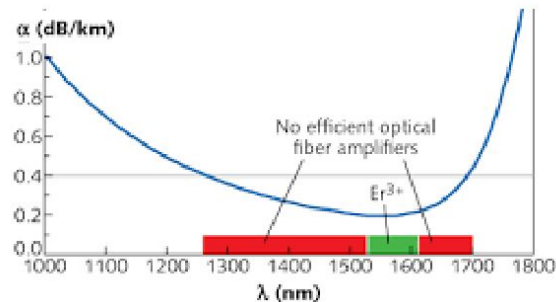
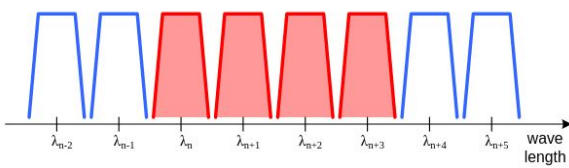
additional degrees of freedom:

- polarization multiplexing
- multicore fiber



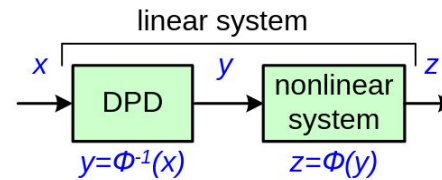
extending of bandwidth:

- multiple wavelengths
- wideband amplifiers



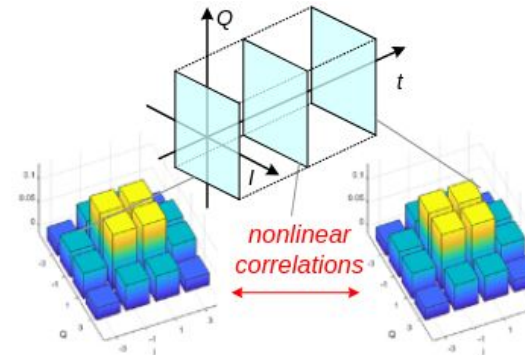
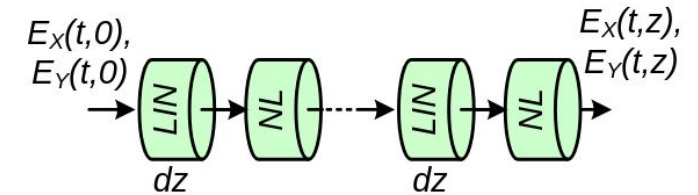
increasing of signal power:

- digital predistortion
- nonlinear modulation



reducing of noise power:

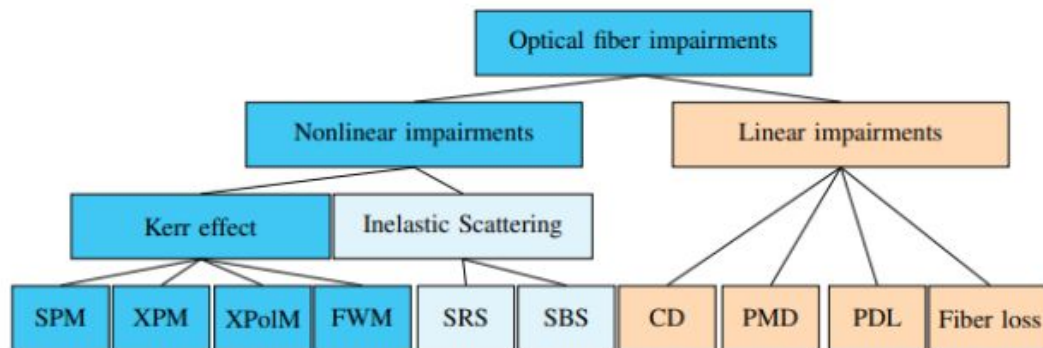
- nonlinear equalization
- wideband amplifiers



# Предметная область

Shannon-Hartley theorem:

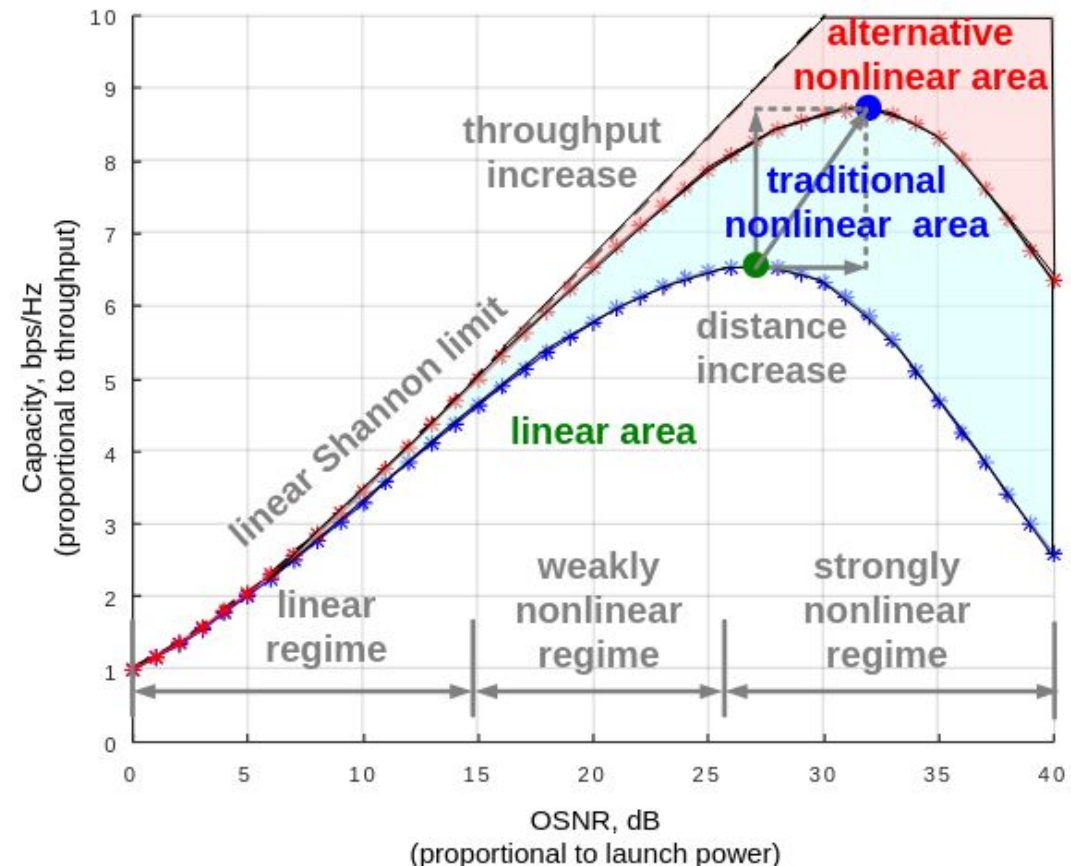
$$C = B \cdot \log_2(1 + S/N)$$



SPM: Self-phase mod., XPM: Cross-phase mod., XPolM: Cross-polarization mod., FWM: Four wave mixing, SBS: Stimulated Brillouin scat., SRS: Stimulated Raman scat., CD: Chromatic disp., PMD: Polarization mode disp., PDL: Polarization depend. loss

$$\frac{\partial \mathbf{E}(t, z)}{\partial z} = -i \underbrace{\frac{\beta}{2}}_{\text{chromatic dispersion}} \frac{\partial^2 \mathbf{E}(t, z)}{\partial t^2} + i \underbrace{\gamma}_{\text{Kerr nonlinearity}} \mathbf{E}(t, z) \|\mathbf{E}(t, z)\|^2 - \underbrace{\alpha}_{\text{fiber loss}} \mathbf{E}(t, z)$$

$$\mathbf{E}(t, z) = [E_X(t, z) E_Y(t, z)]^T$$



# Предметная область

## Split-Step Fourier Method:

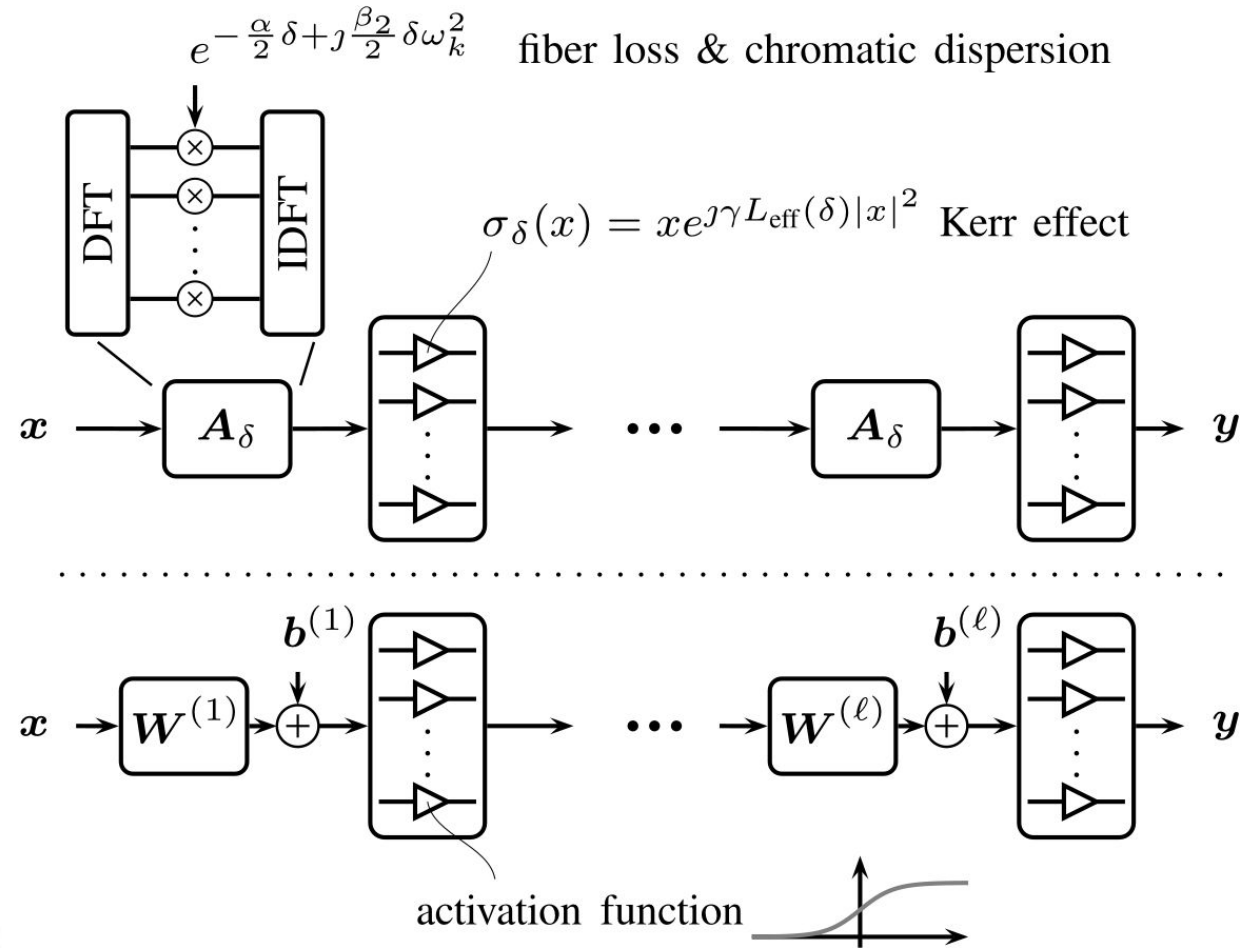
$$\frac{\partial A}{\partial z} = (\hat{D} + \hat{N})A$$

$$\hat{D} = -\frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial T^2} - \alpha$$

$$\hat{N} = i\gamma|A|^2$$

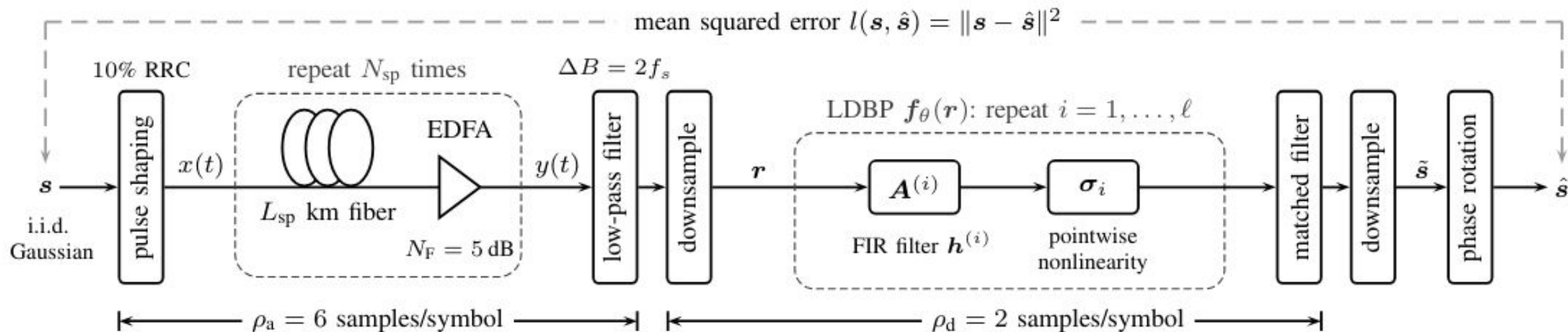
$$A(z+h, T) \approx \exp(h\hat{D}) \exp(h\hat{N})A(z, T)$$

$$A(z+h, T) = \exp(\hat{D} + \hat{N})A(z, T)$$



$$\exp(A) \exp(B) = \exp\left(A + B + \frac{1}{2}[A, B] + \frac{1}{12}[A - B, [A, B]]\right)$$

# Предметная область





# Содержательная постановка задачи

## Цель исследования

Обучение цифрового алгоритма обратного распространения (LDBP) для компенсации нелинейных искажений сигнала на реальном датасете Huawei

## Задачи исследования

- Сформировать теоретическую базу
- Получить и проанализировать датасет
- Определить параметры ВОЛС
- Спроектировать обучаемую модель
- Разработать математическую постановку задачи

## Объект исследования

Оптическое волокно и нелинейные искажения сигнала в long-haul оптических кабелях (>600 км)

## Предмет исследования

Методы компенсации нелинейных искажений в long-haul оптических кабелях: методы DBP, PBM и их модификации, в частности, Learned DBP

# Математическая постановка задачи

$$\theta^* = \arg \min_{\theta} \mathcal{L}(\theta)$$

Канал:  $\mathcal{H} : \mathbb{C}^n \rightarrow \mathbb{C}^n$  – оператор распространения импульса в оптоволокне, описываемый нелинейным уравнением Шрёдингера (NLSE)

Переданный сигнал:  $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^n$

Принятый сигнал:  $\mathbf{y} = \mathcal{H}(\mathbf{x}) + \mathbf{n} \in \mathbb{C}^n$ , где шум  $\mathbf{n} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2 \mathbf{I})$

Обучающая выборка:  $\mathcal{D} = \{(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i)\}_{i=1}^N$

Модель Learned DBP:  $\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{f}_{\theta}(\mathbf{y})$ , где  $\theta = \{\mathbf{h}^{(1)}, \dots, \mathbf{h}^{(M)}\}$  – коэффициенты  $M$  симметричных FIR (finite impulse response) фильтров.

Функция потерь:  $\mathcal{L}(\theta) = (1/N) \sum_{i=1}^N \ell(\mathbf{x}^{(i)}, \mathbf{f}_{\theta}(\mathbf{y}^{(i)}))$ , где  $\ell(\mathbf{x}, \hat{\mathbf{x}}) = |\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}|^2$

# Исходные данные

**Источник:** Moscow Optic Algorithm Laboratory, Huawei

**Предметная область:** цифровая компенсация нелинейных искажений в оптоволокне.

**Объем:** 259072 кортежей из двух комплексных чисел (квадрат длины – мощность, аргумент – фаза сигнала), первое – исходный сигнал, второе – принятый на входе DSP чипа.

Источник сигнала: лазер с длиной волны **1550** нм и излучаемой мощностью **>10** дБм

Протяжённость линии: **>640** км

Формат модуляции: **16QAM** (4 бита на символ) с кодированием Грея (Gray mapping)

Коэффициент затухания ( $\alpha$ ): **0.2** дБ/км

Коэффициент хроматической дисперсии ( $\beta_2$ ): **-21.683** пс<sup>2</sup>/км

Нелинейный коэффициент Керра ( $\gamma$ ): **1.3** рад/(Вт·км)



# Инструментарий

## Математические разделы

1. Теория дифференциальных уравнений
2. Векторный и комплексный анализ
3. Методы оптимизации

## Методы моделирования и анализов результатов

1. Математическое и алгоритмическое моделирование LDBP модели
2. Сравнительный вычислительный анализ моделей компенсации нелинейных искажений

## Методы глубокого обучения

1. Physics-Informed Neural Networks (PINN) – параметризация SSFM
2. Оптимизатор Adam – обучение параметров FIR фильтров

## Технологический стек

1. Язык программирования: Python
2. Используемые библиотеки: Tensorflow, NumPy, Pandas

# Выводы

- Проведен аналитический обзор научных источников в области алгоритмов цифровой компенсации нелинейных искажений в ВОЛС
- Получен и проанализирован датасет от лаборатории Huawei
- Спроектирована модель Learned DBP с использованием FIR фильтров вместо линейных слоев и с фиксированной нелинейностью
- Сформулирована математическая задача КНИР: оптимизация лосс-функции на основе среднеквадратичной ошибки восстановления исходного сигнала



↑  
**Спасибо  
за внимание!**

