

Методы машинного обучения для компенсации искажений сигналов в волоконно-оптических линиях связи

О.С. Сидельников^{1*}, А.А. Редюк¹, Е.А. Аверьянов,
С. Сиглетос², С.К. Турицын², М.П. Федорук¹

¹Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск

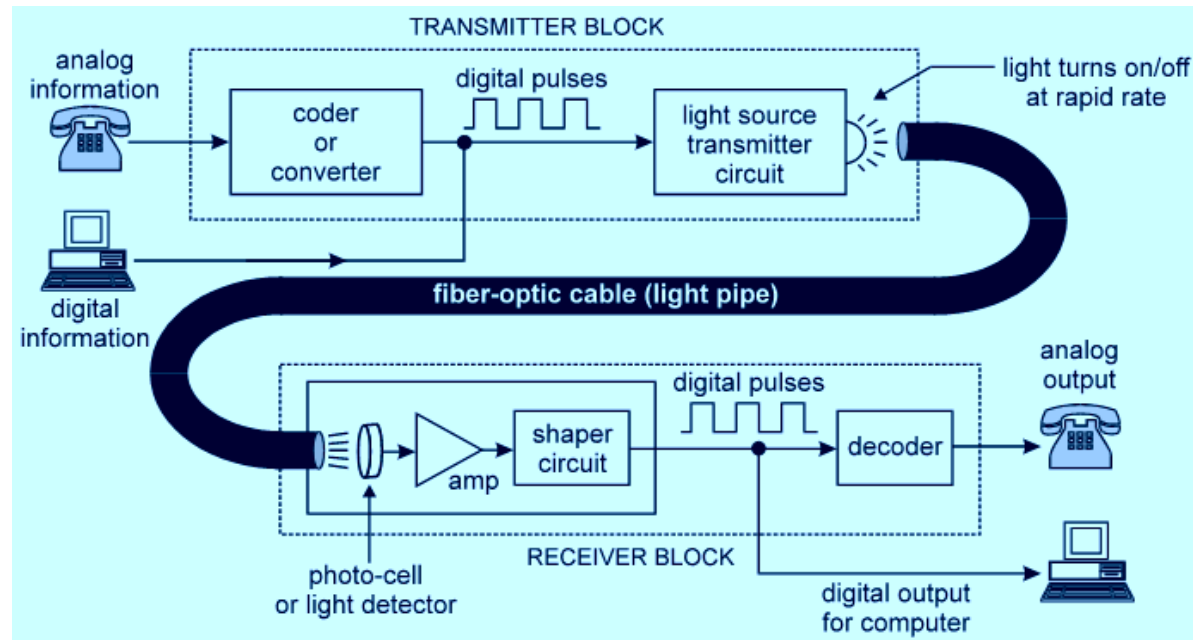
²Университет Астана, г. Бирмингем, Великобритания

*o.s.sidelnikov@gmail.com

План доклада

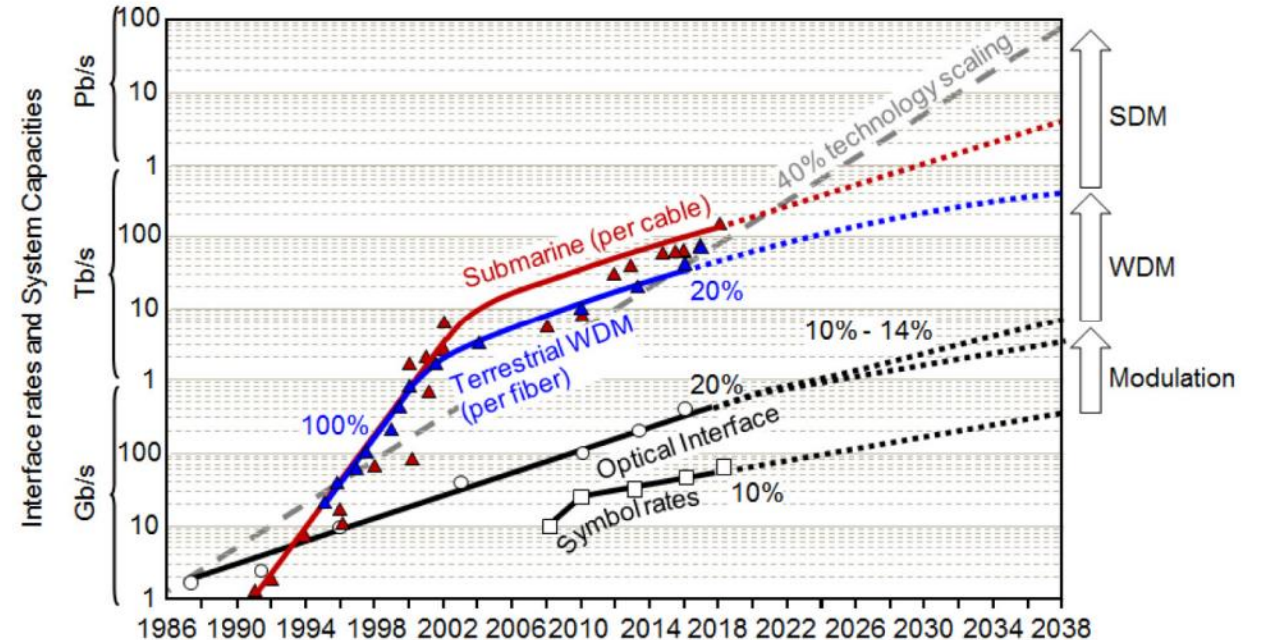
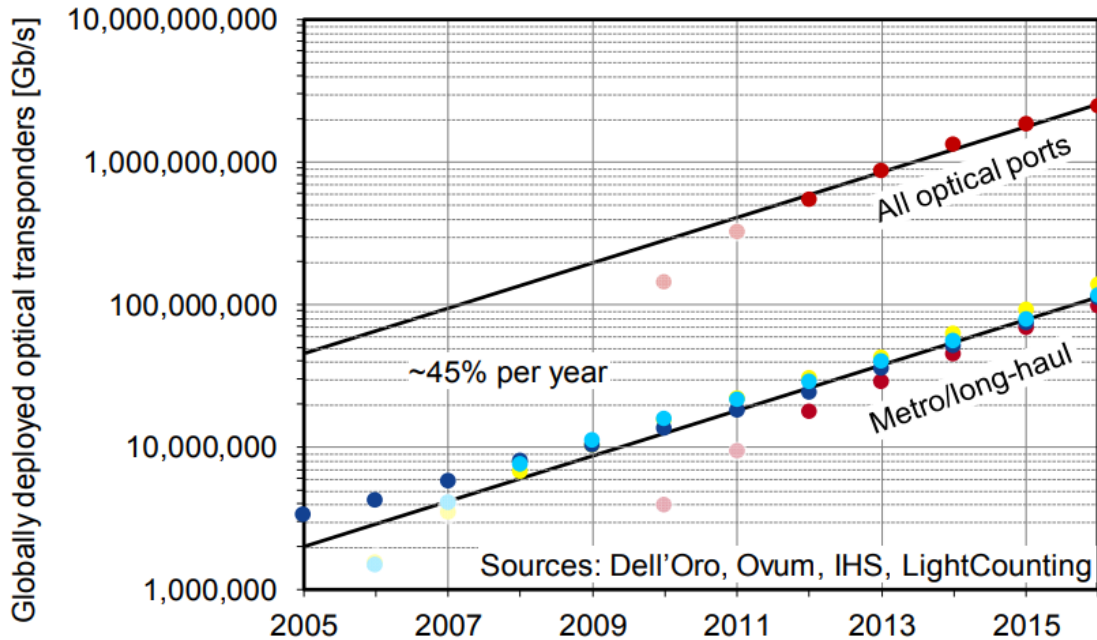
1. Мотивация
2. Устройство волоконно-оптических линий связи
3. Применение методов МО в линиях связи
4. Методы МО для компенсации искажений сигнала в линиях связи
 - Классификация
 - Полносвязные нейронные сети
 - Сверточные нейронные сети
 - Теория возмущений

Мотивация



Мотивация

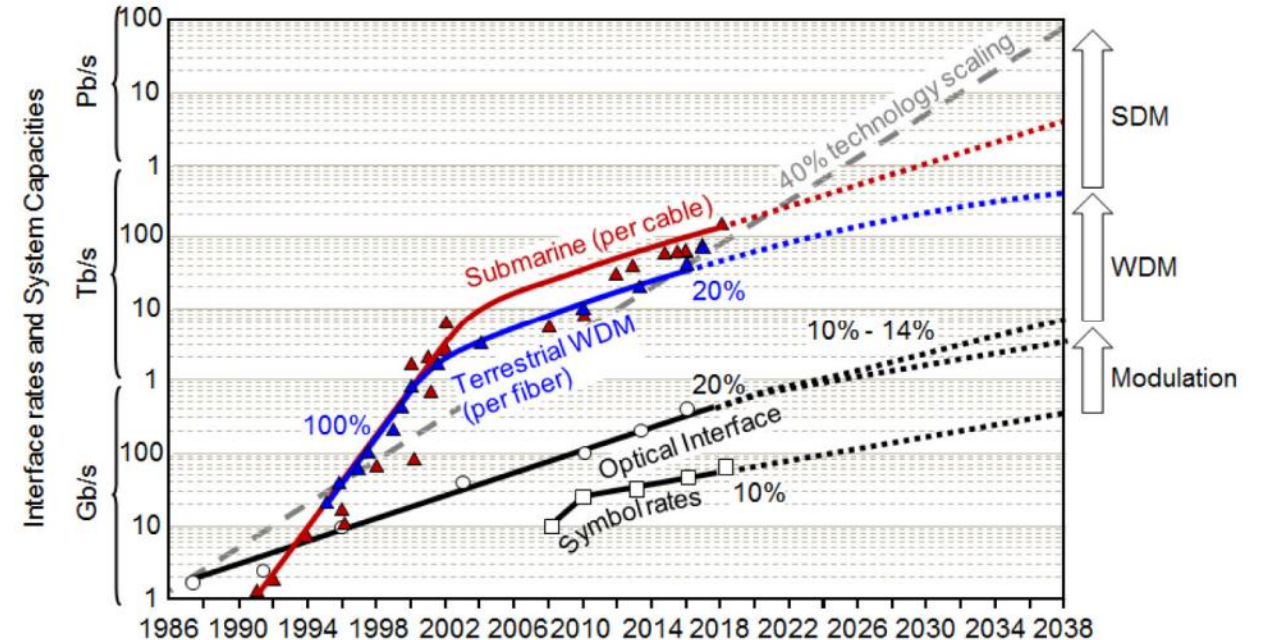
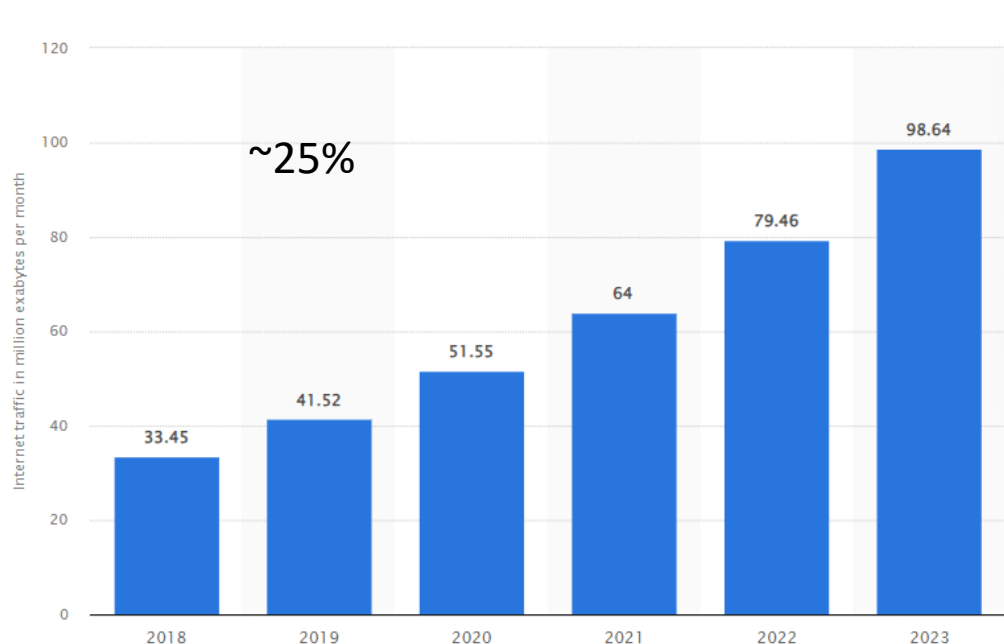
- Рост общемирового информационного трафика ~45% в год
- Развитие технологий современных линий связи ~20% в год



Winzer, P. J., Neilson, D. T., & Chraplyvy, A. R. (2018). Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years. *Optics express*, 26(18), 24190-24239.

Мотивация

- Рост общемирового информационного трафика ~45% в год
- Развитие технологий современных линий связи ~20% в год

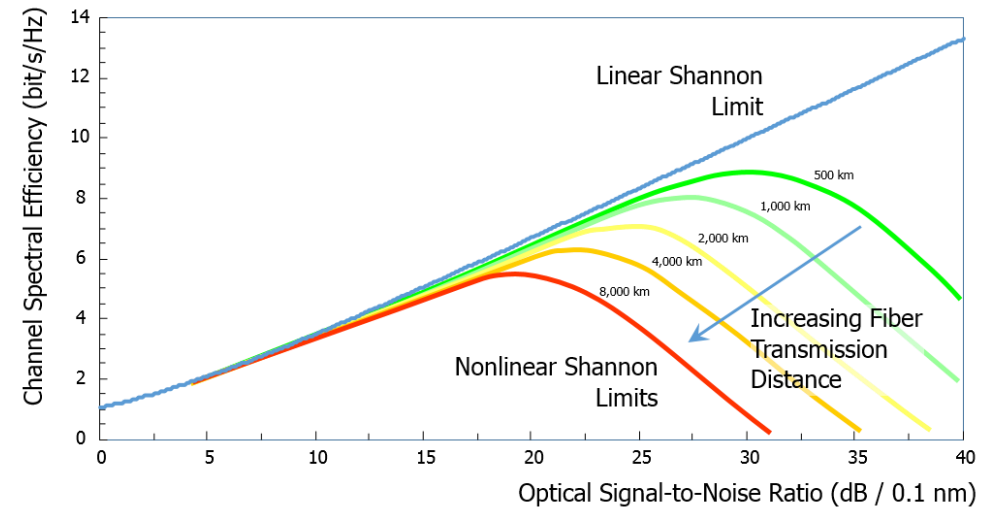
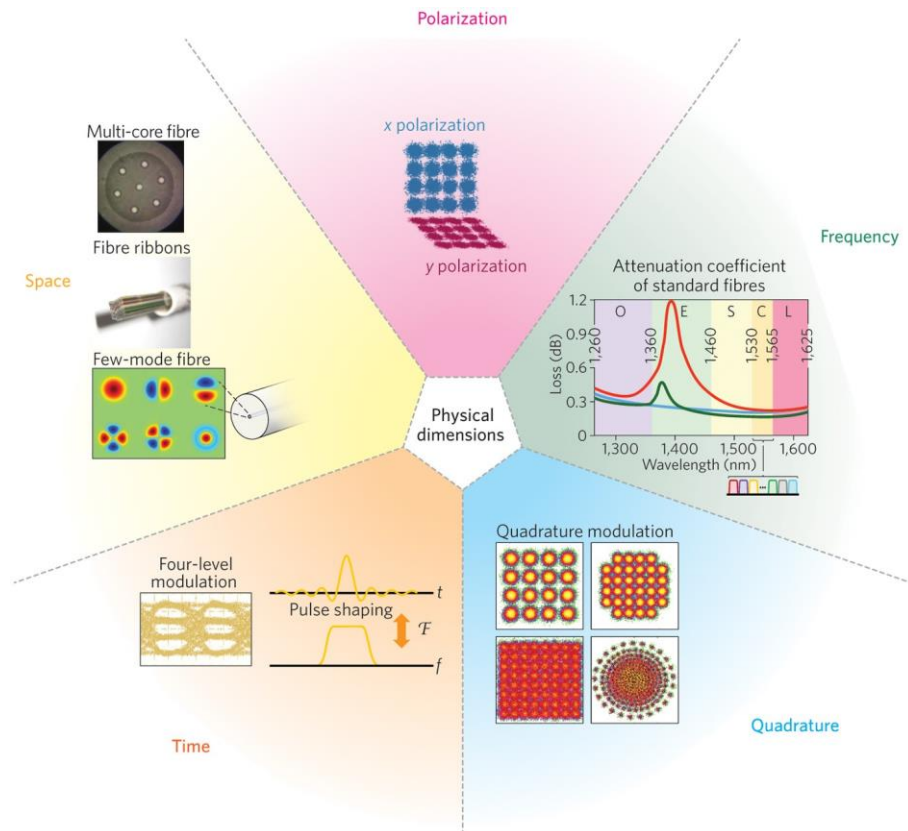


<https://www.statista.com/statistics/216335/data-usage-per-month-in-the-us-by-age/>

Winzer, P. J., Neilson, D. T., & Chraplyvy, A. R. (2018). Fiber-optic transmission and networking: the previous 20 and the next 20 years. *Optics express*, 26(18), 24190-24239.

Мотивация

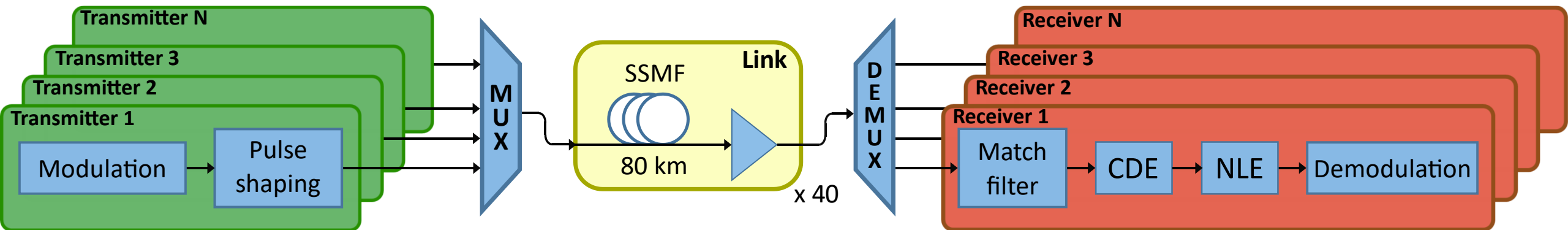
- В современных системах задействуются все имеющиеся степени свободы
- Нелинейные эффекты ограничивают пропускную способность линий связи



Winzer, P. J. (2014). Making spatial multiplexing a reality. Nature Photonics, 8(5), 345-348.

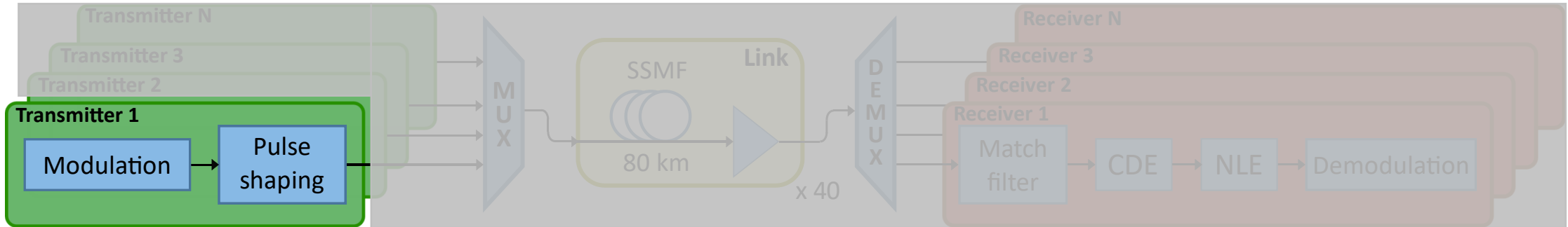
<http://opticalcloudinfra.com/index.php/2017/07/09/shannon-limit-sets-upper-bar-optical-networks/>

Устройство ВОЛС



Устройство ВОЛС

Передатчик. Модуляция

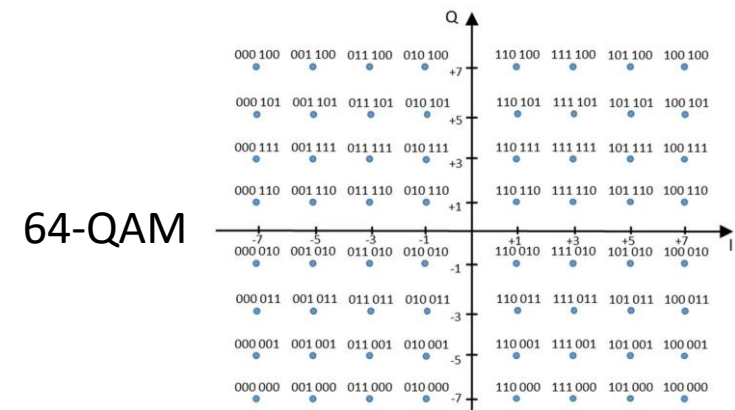
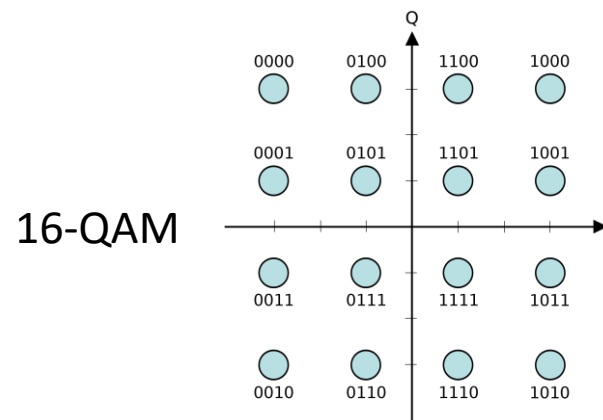
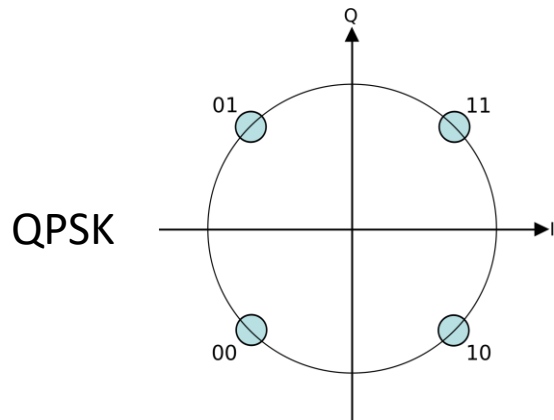


Битовая
последовательность

b_k : 0110 0101 0011 1101

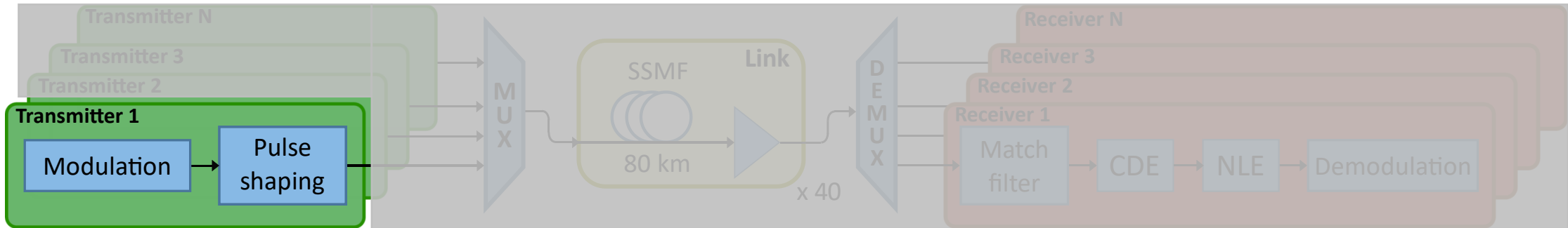
Символьная
последовательность

c_k : $-1-3j$ $-1+1j$ $-3-1j$ $1+1j$



Устройство ВОЛС

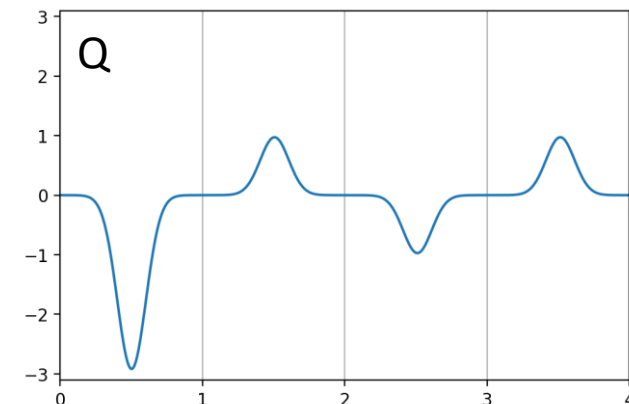
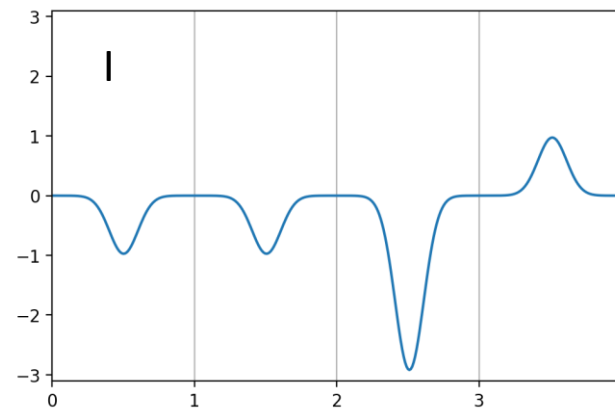
Передатчик. Форма импульса



Передаваемый сигнал $s(t)$

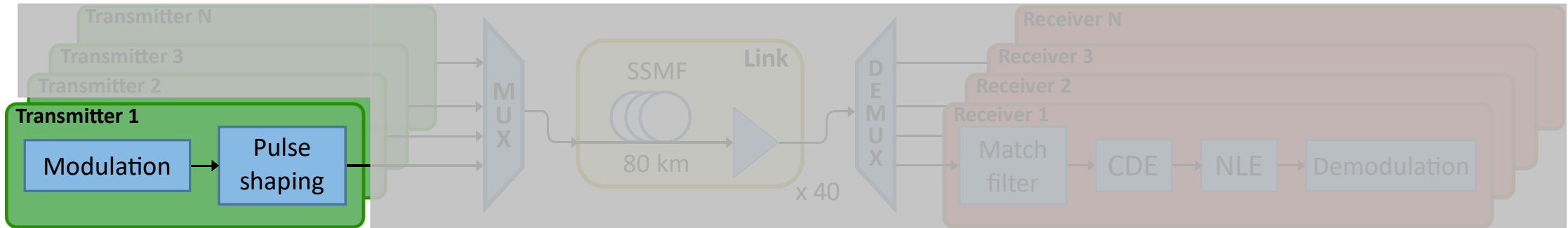
Символьная
последовательность

$c_k: -1-3j \quad -1+1j \quad -3-1j \quad 1+1j$

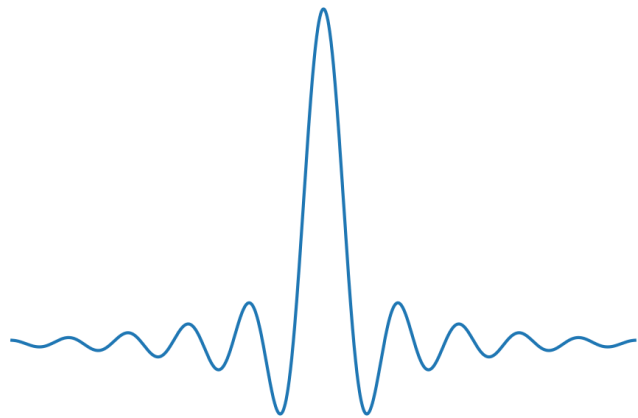


Устройство ВОЛС

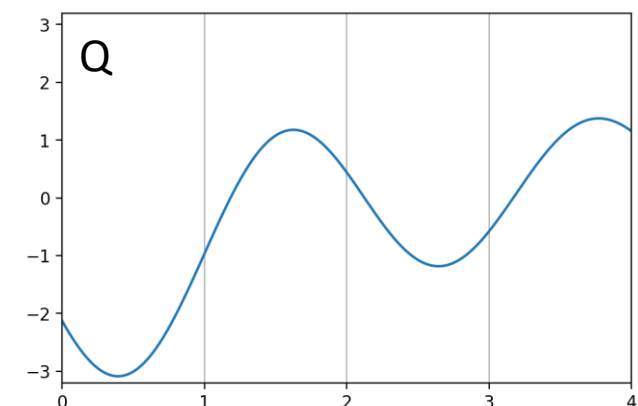
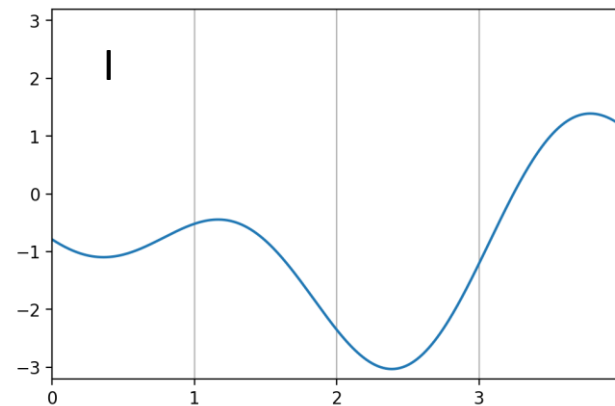
Передатчик. Форма импульса



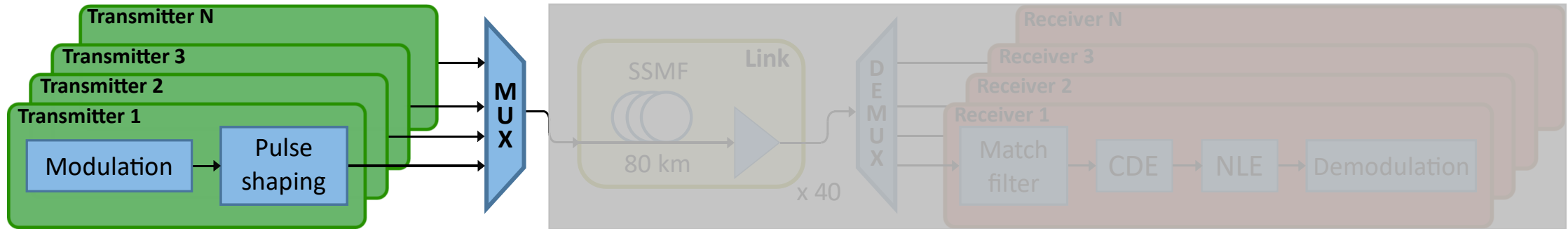
Root-raised-cosine filter



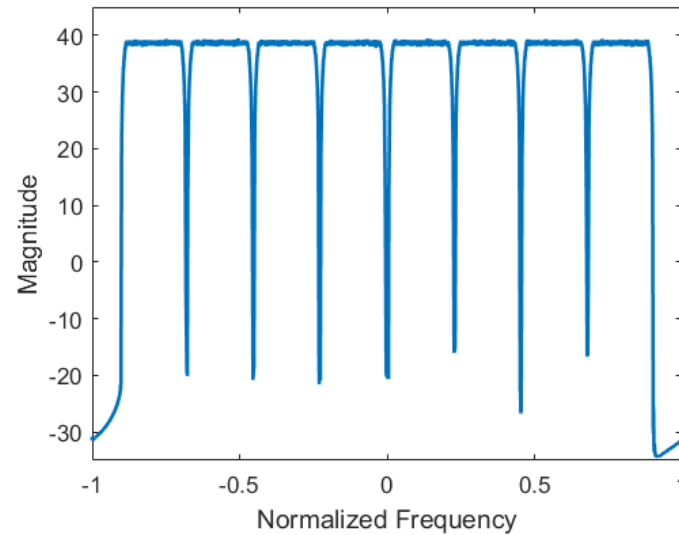
Передаваемый сигнал $s(t)$



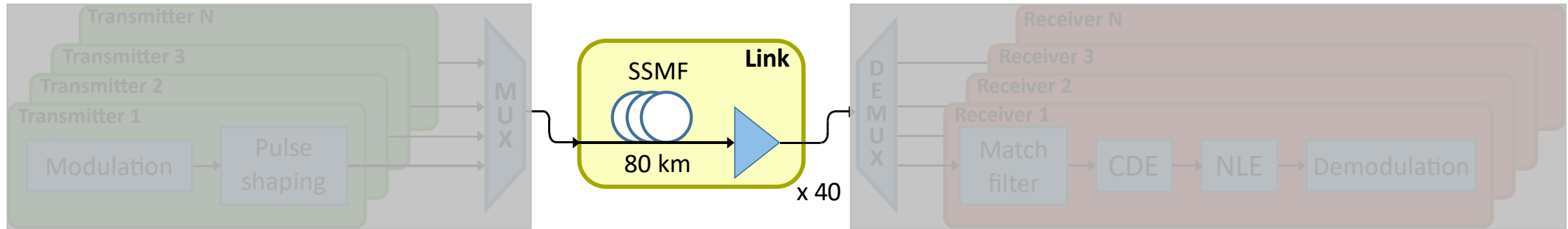
Устройство ВОЛС Передатчик



$$s(t) = \sum_{k=1}^N s_k(t) \cdot e^{j\omega_k t}$$



Устройство ВОЛС Канал



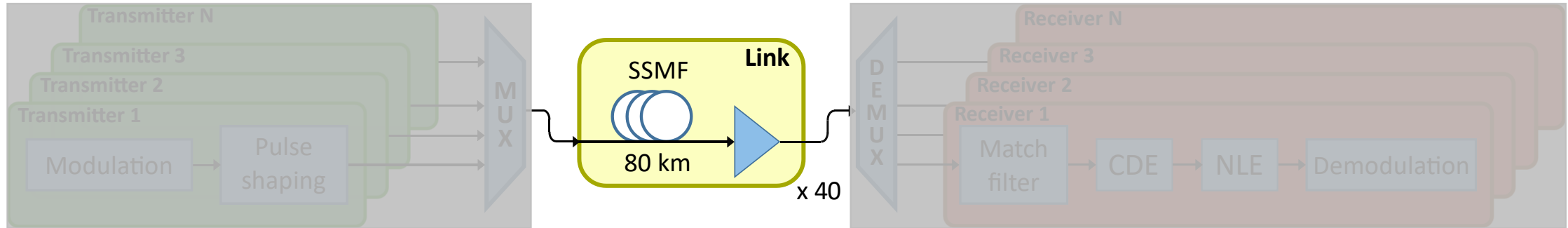
- Нелинейное уравнение Шрёдингера

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}A - j\frac{\beta_2}{2}\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + j\gamma|A|^2A$$

- Усилитель

$$\tilde{A} = A \cdot e^{\frac{\alpha}{2}L_{sp}} + \eta$$

Устройство ВОЛС Канал



- Нелинейное уравнение Шрёдингера

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}A - j\frac{\beta_2}{2}\frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + j\gamma|A|^2A$$

- Усилитель

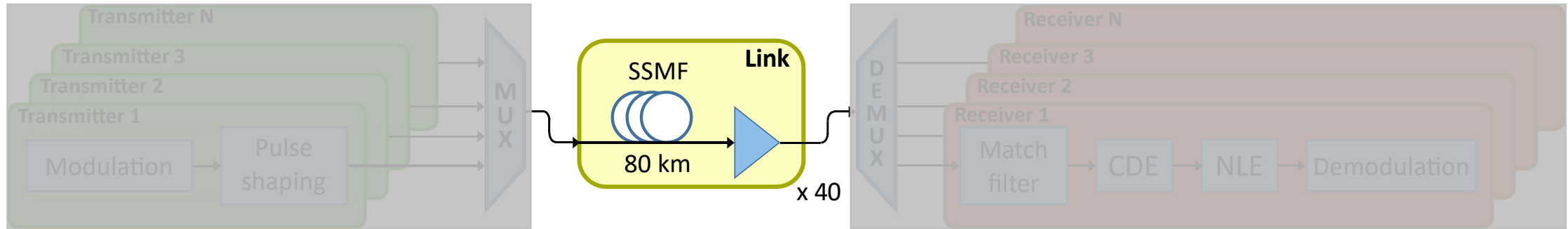
$$\tilde{A} = A \cdot e^{\frac{\alpha}{2}L_{sp}} + \eta$$

- Система уравнений Манакова

$$\frac{\partial A_x}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}A_x - j\frac{\beta_2}{2}\frac{\partial^2 A_x}{\partial t^2} + j\gamma\frac{8}{9}\left(|A_x|^2 + |A_y|^2\right)A_x$$

$$\frac{\partial A_y}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}A_y - j\frac{\beta_2}{2}\frac{\partial^2 A_y}{\partial t^2} + j\gamma\frac{8}{9}\left(|A_x|^2 + |A_y|^2\right)A_y$$

Устройство ВОЛС Канал



- Split-step Fourier method

$$\frac{\partial A}{\partial z} = [\hat{D} + \hat{N}]A$$

$$A(z + h, t) \approx \exp\left(\frac{h}{2}\hat{D}\right) \exp(h\hat{N}) \exp\left(\frac{h}{2}\hat{D}\right) A(z, T)$$

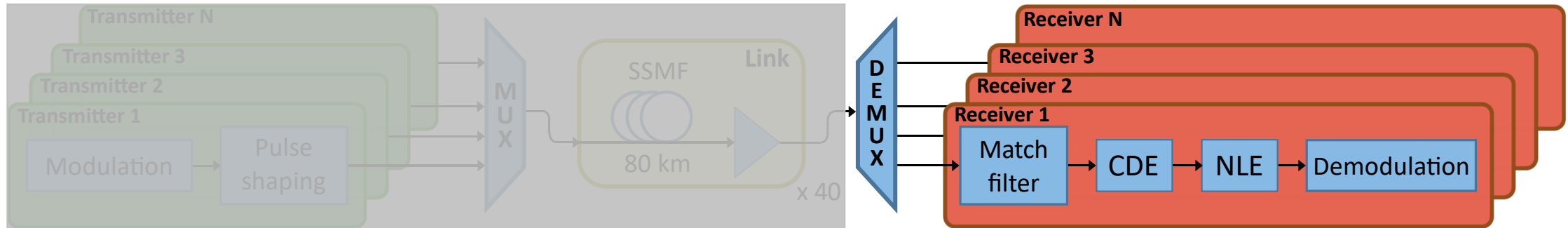
$$\exp(h\hat{D}) A(z, T) = F_T^{-1} \exp[h\hat{D}(-j\omega)] F_T A(z, T)$$

$$\exp[h\hat{D}(-j\omega)] = e^{-\left(\frac{\alpha}{2} + j\frac{\beta_2}{2}\omega^2\right)h}$$

$$\exp(h\hat{N}) = e^{j\gamma|A(z)|^2 h}$$

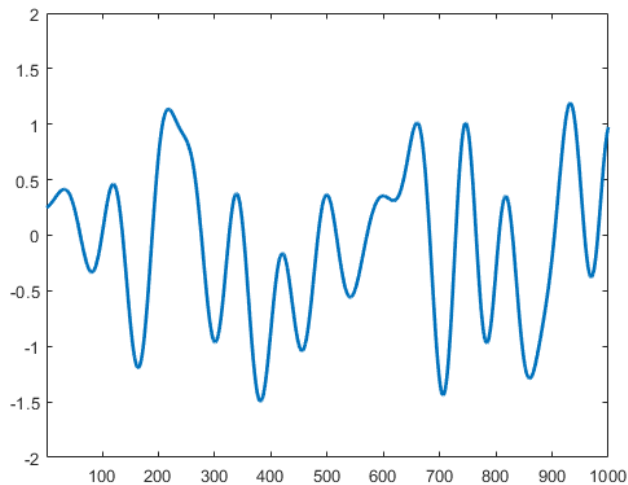
Устройство ВОЛС

Приемник



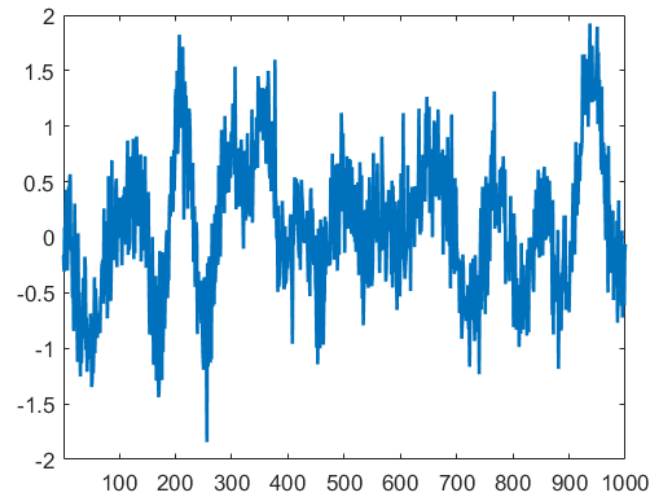
Переданный сигнал

$$s(t)$$



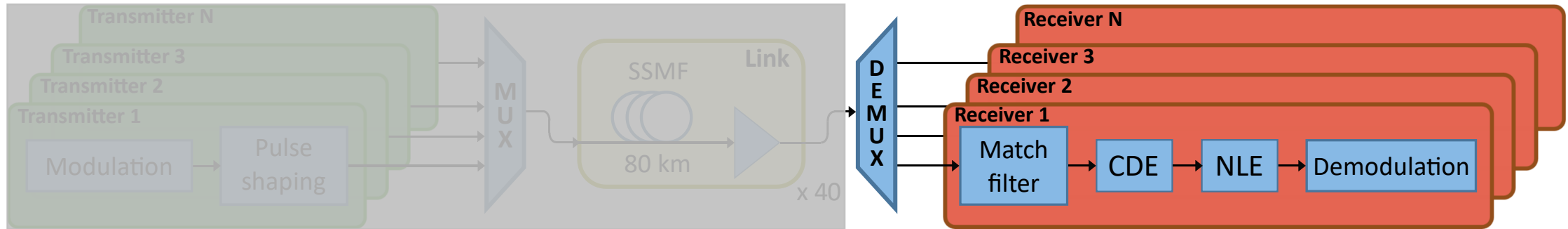
Принятый сигнал

$$\tilde{s}(t)$$



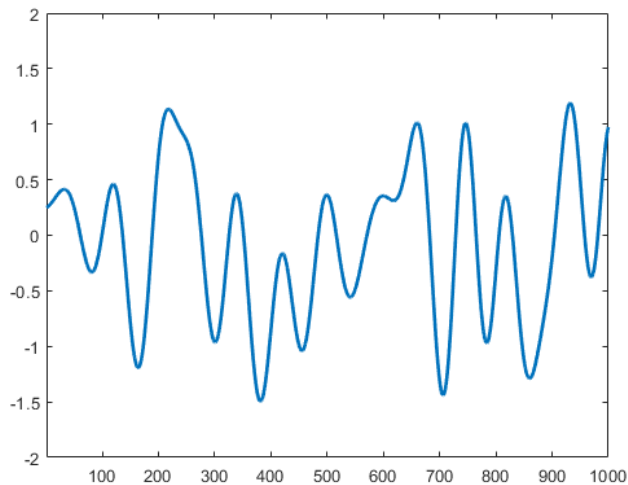
Устройство ВОЛС

Приемник



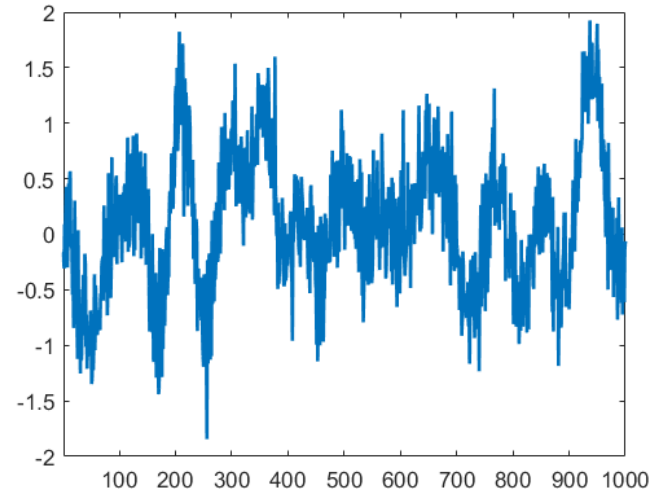
Переданный сигнал

$s(t)$



Принятый сигнал

$\tilde{s}(t)$

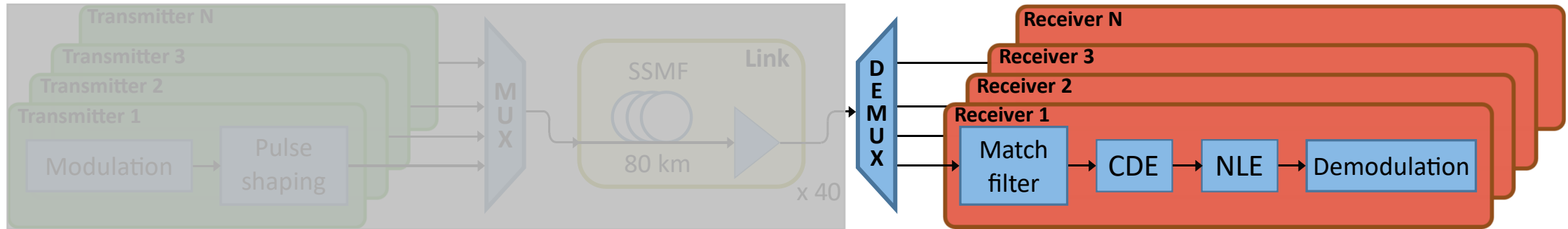


Восстановление сигнала

$$s(t) = F_{ch}^{-1}(\tilde{s}(t))$$

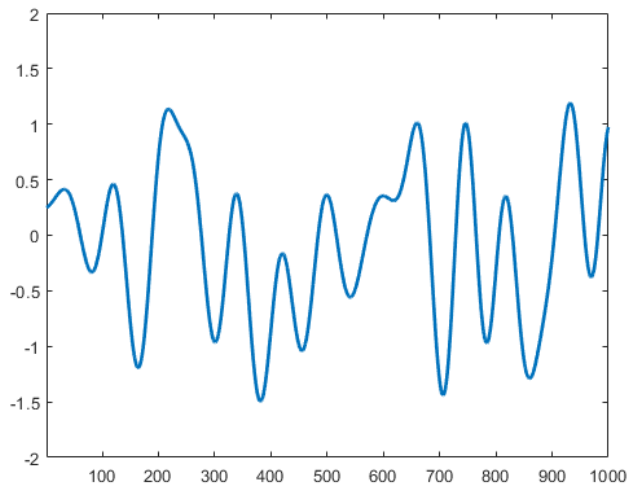
Устройство ВОЛС

Приемник



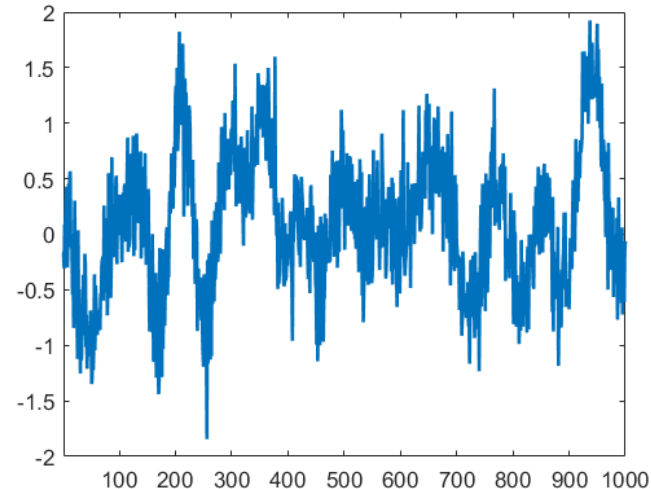
Переданный сигнал

$s(t)$



Принятый сигнал

$\tilde{s}(t)$



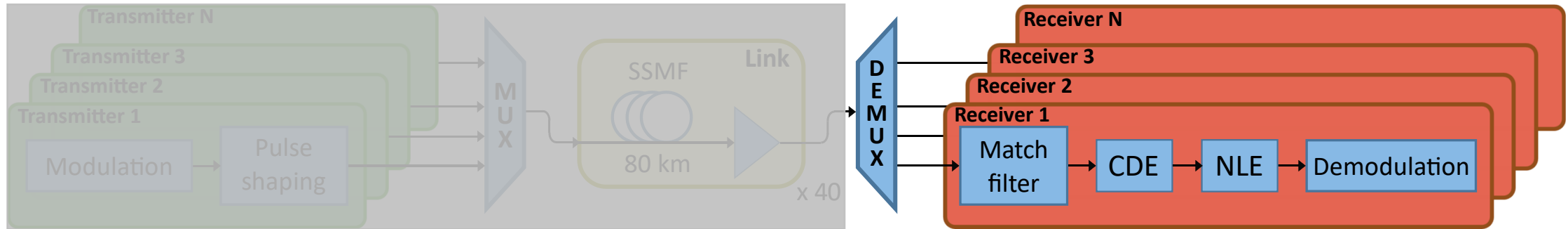
Восстановление сигнала

$$s(t) = F_{ch}^{-1}(\tilde{s}(t))$$

$$s_k = F_{ch}^{-1}(\tilde{s}_{k-M}, \dots, \tilde{s}_k, \dots, \tilde{s}_{k+M})$$

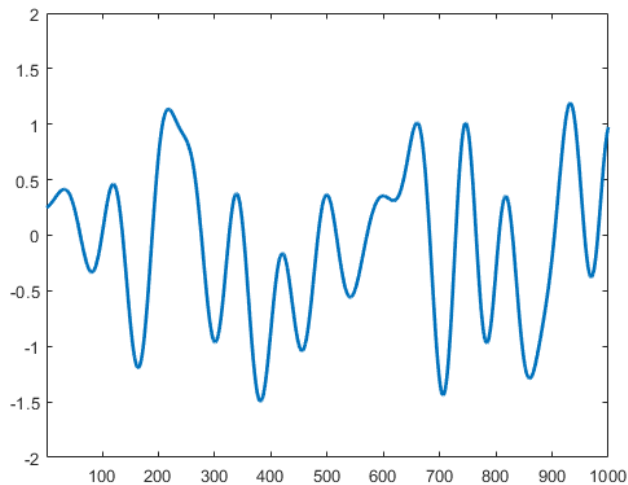
Устройство ВОЛС

Приемник



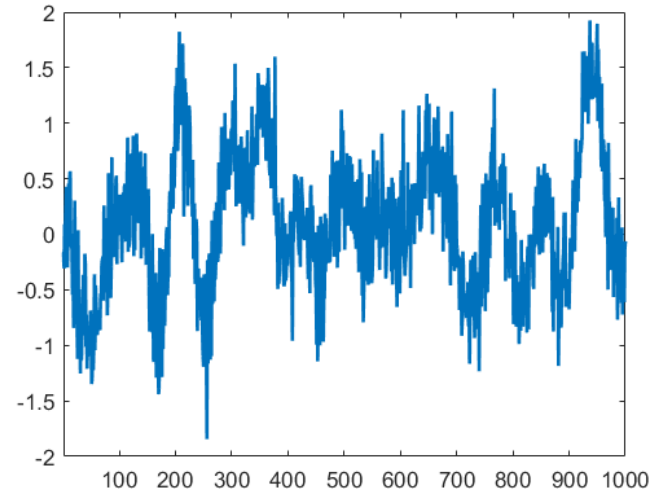
Переданный сигнал

$s(t)$



Принятый сигнал

$\tilde{s}(t)$



Восстановление сигнала

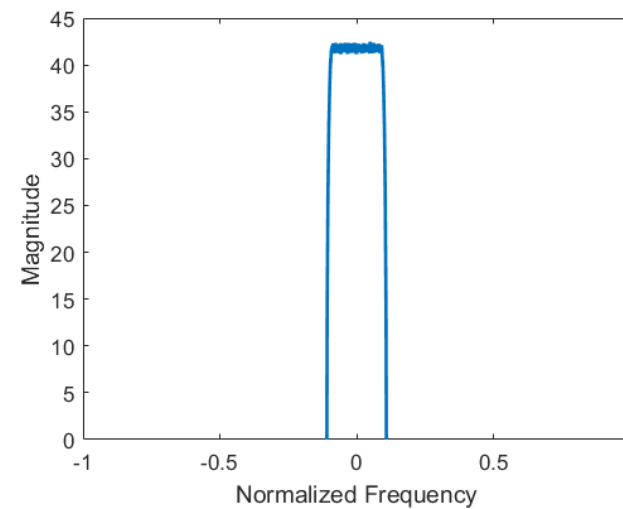
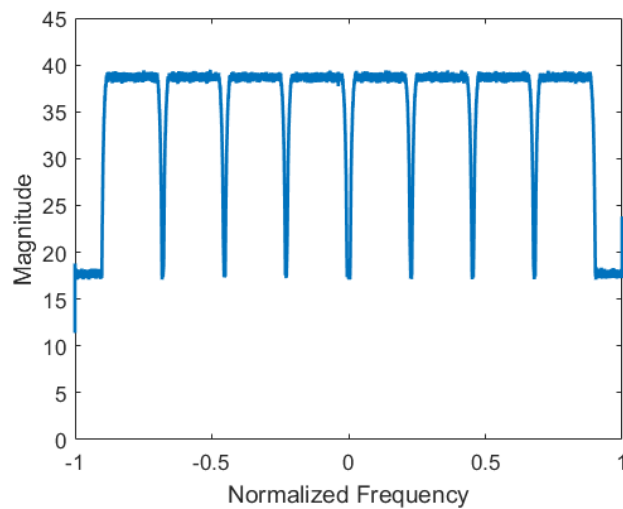
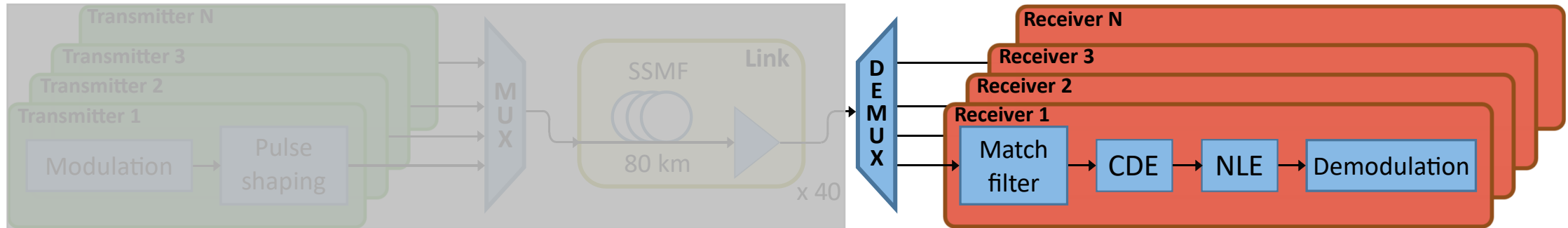
$$s(t) = F_{ch}^{-1}(\tilde{s}(t))$$

$$s_k = F_{ch}^{-1}(\tilde{s}_{k-M}, \dots, \tilde{s}_k, \dots, \tilde{s}_{k+M})$$

$$c_k = F_{ch}^{-1}(\tilde{c}_{k-M}, \dots, \tilde{c}_k, \dots, \tilde{c}_{k+M})$$

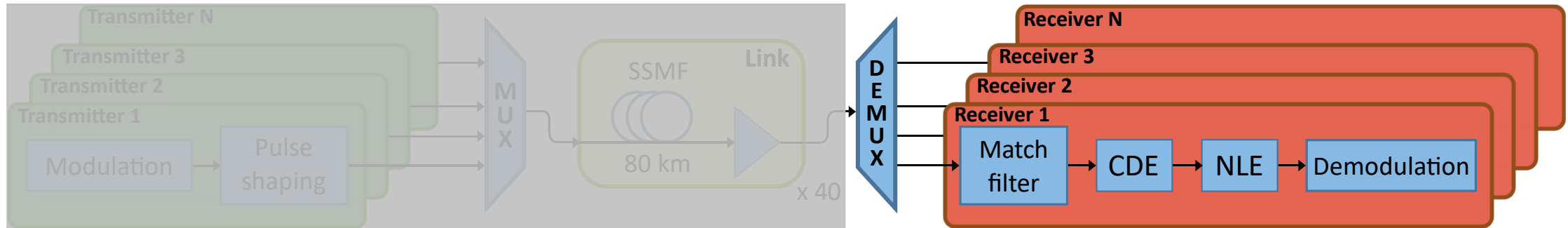
Устройство ВОЛС

Приемник. Согласованный фильтр



Устройство ВОЛС

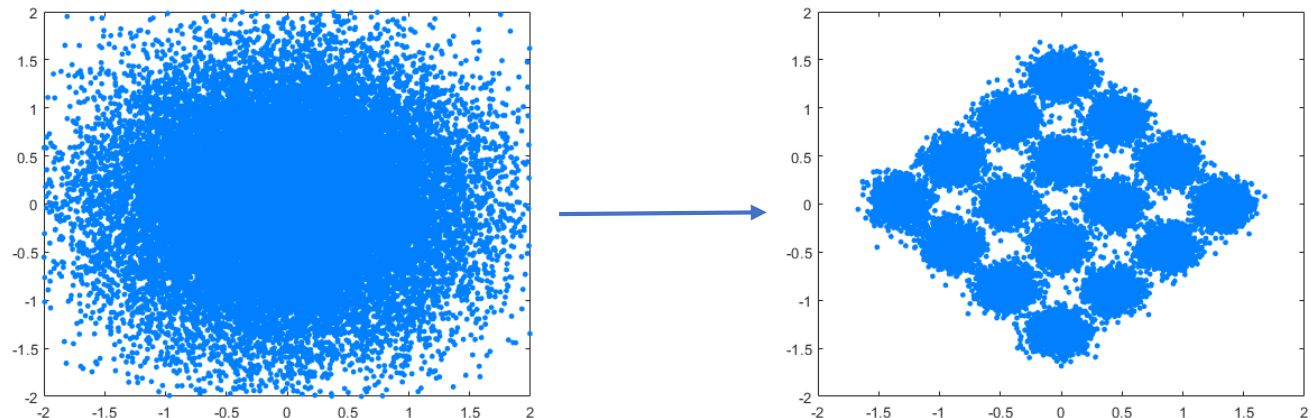
Приемник. Компенсация дисперсия



«Отмотка» дисперсии в частотной области :

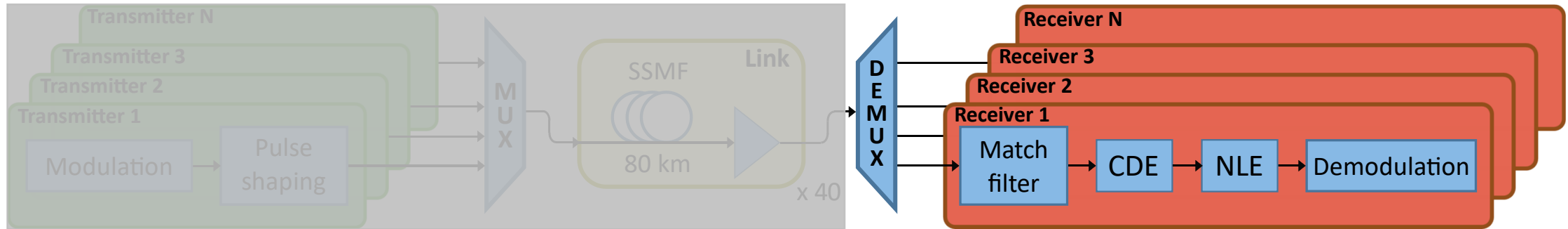
$$\frac{\partial A}{\partial z} = j \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2}$$

$$\tilde{A} = F_T^{-1} \exp[L\hat{D}(-j\omega)] F_T A$$

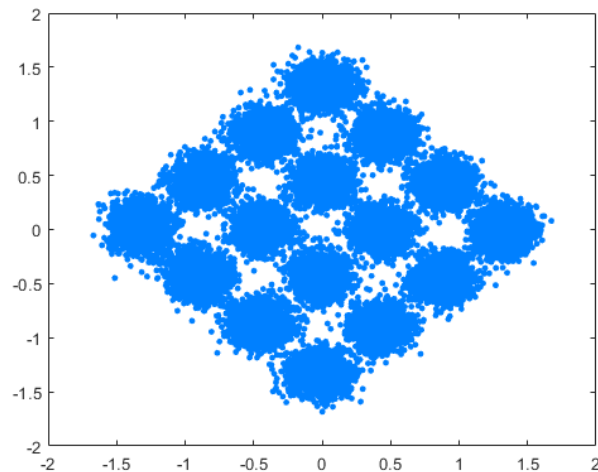


Устройство ВОЛС

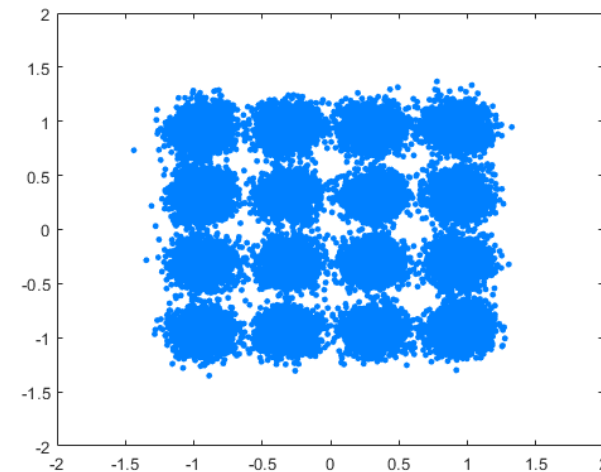
Приемник. Компенсация нелинейных эффектов



Восстановление фазы принятого сигнала:

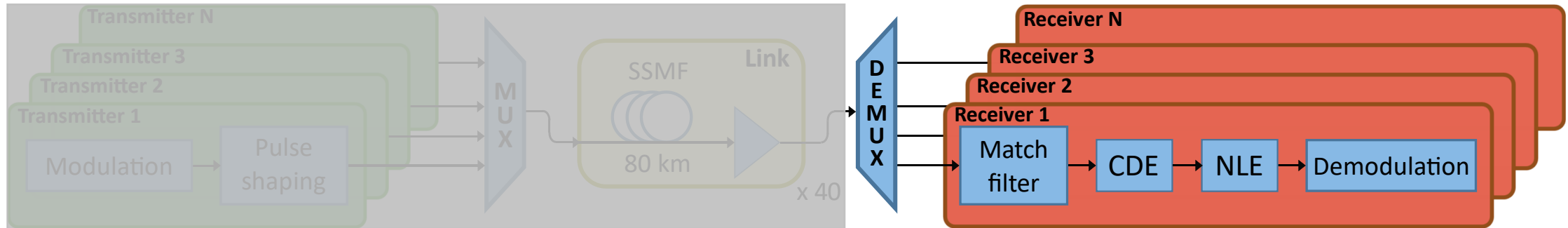


$$\tilde{c}_k = c_k \cdot e^{i\varphi}$$



Устройство ВОЛС

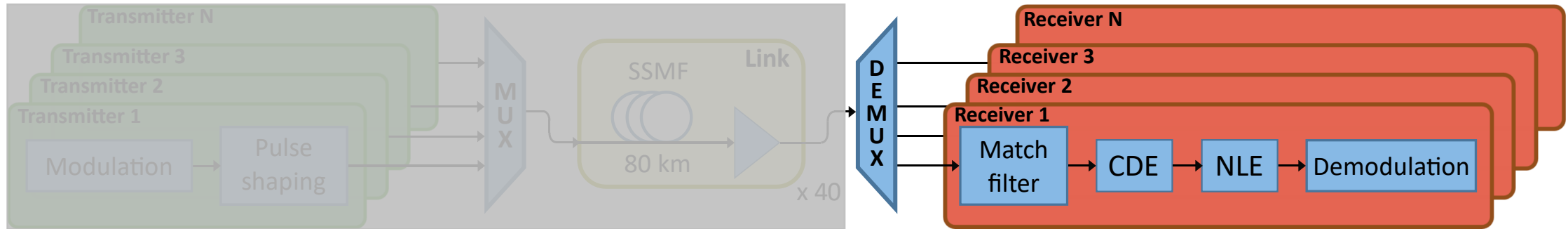
Приемник. Компенсация нелинейных эффектов



- Digital back propagation
- Ряды Вольтерра (Volterra function-based methods)
- Методы на основе теория возмущений (Perturbation-based equalization)
- Методы машинного обучения

Устройство ВОЛС

Приемник. Компенсация нелинейных эффектов



3416

JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 26, NO. 20, OCTOBER 15, 2008

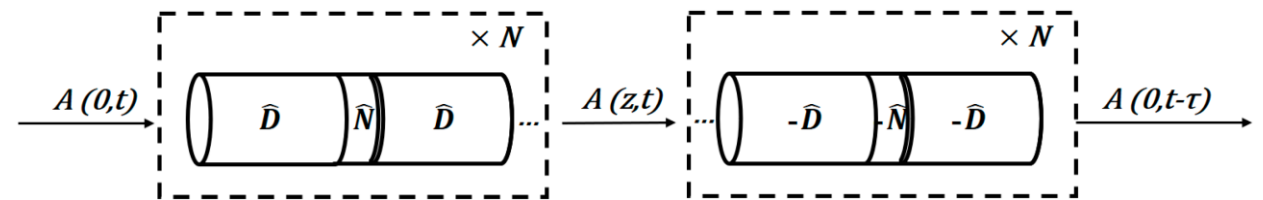
- **Digital back propagation**

$$\frac{\partial A}{\partial z} = j \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} - j\gamma |A|^2 A$$

- SSFM
- Малая частота дискретизации
- Малое число шагов на пролет

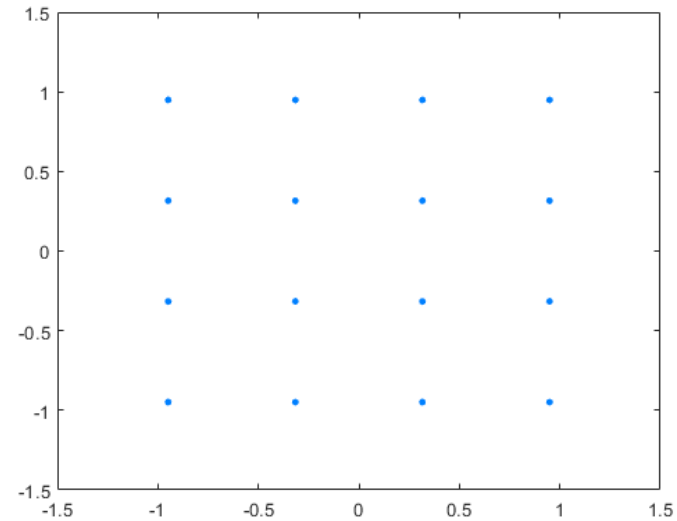
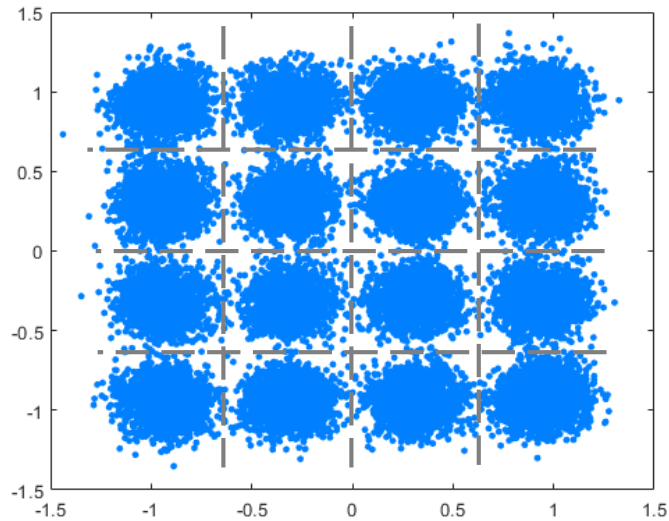
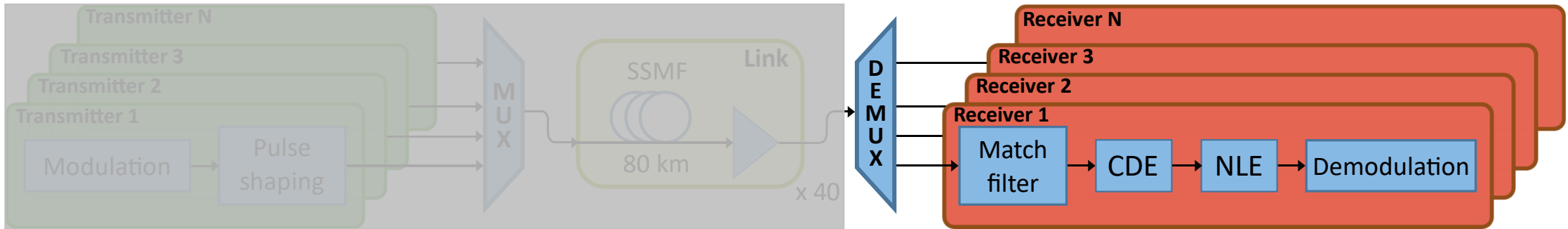
Compensation of Dispersion and Nonlinear Impairments Using Digital Backpropagation

Ezra Ip and Joseph M. Kahn, *Fellow, IEEE*



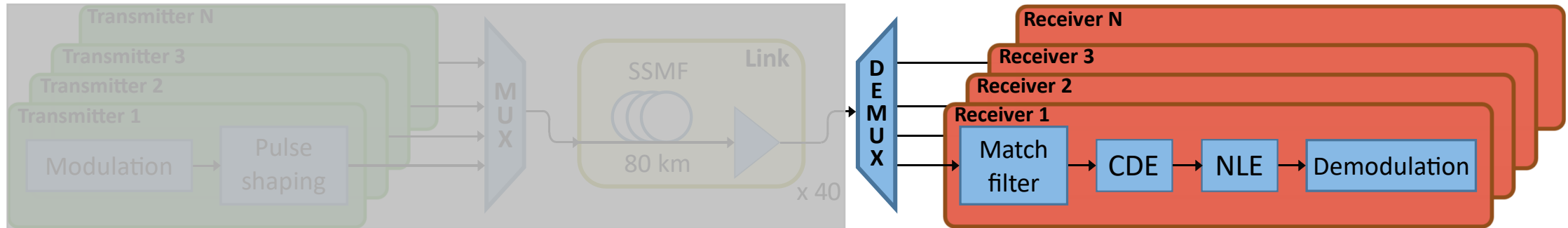
Устройство ВОЛС

Приемник. Демодуляция



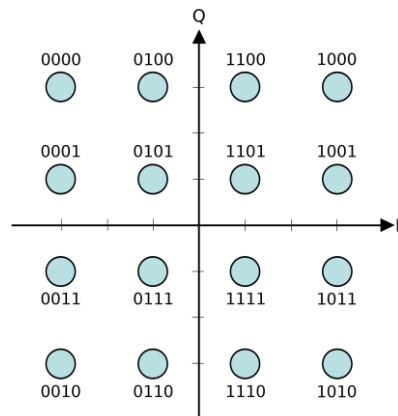
Устройство ВОЛС

Приемник. Демодуляция



Символьная
последовательность

\tilde{c}_k : -1-3j -1+1j -3-1j 1+1j

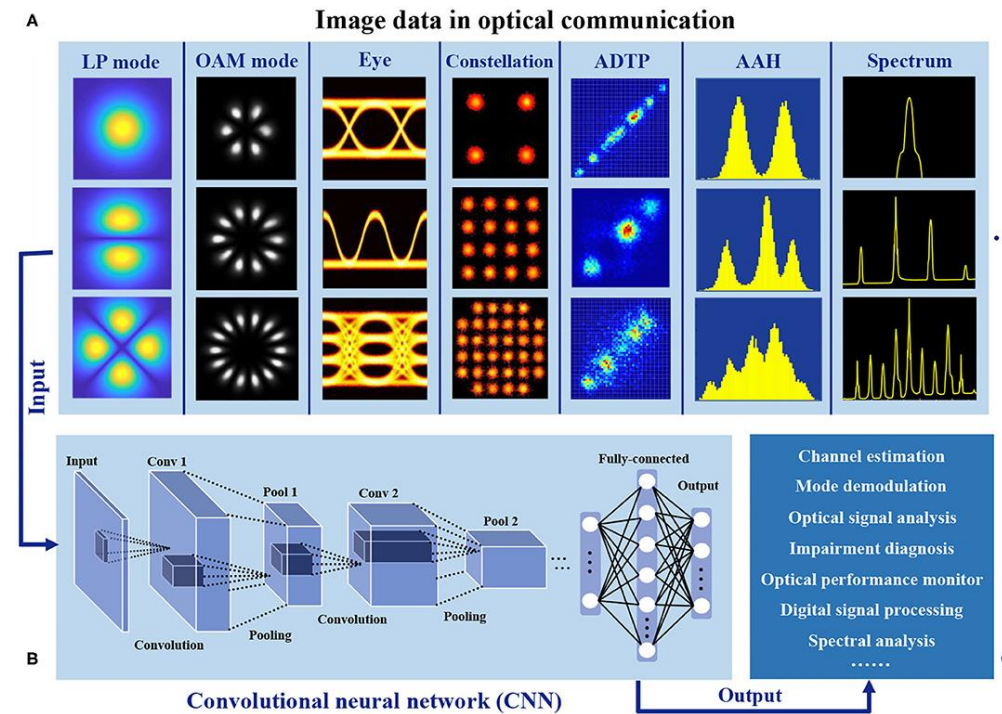


Битовая
последовательность

\tilde{b}_k : 0110 0101 0011 1101

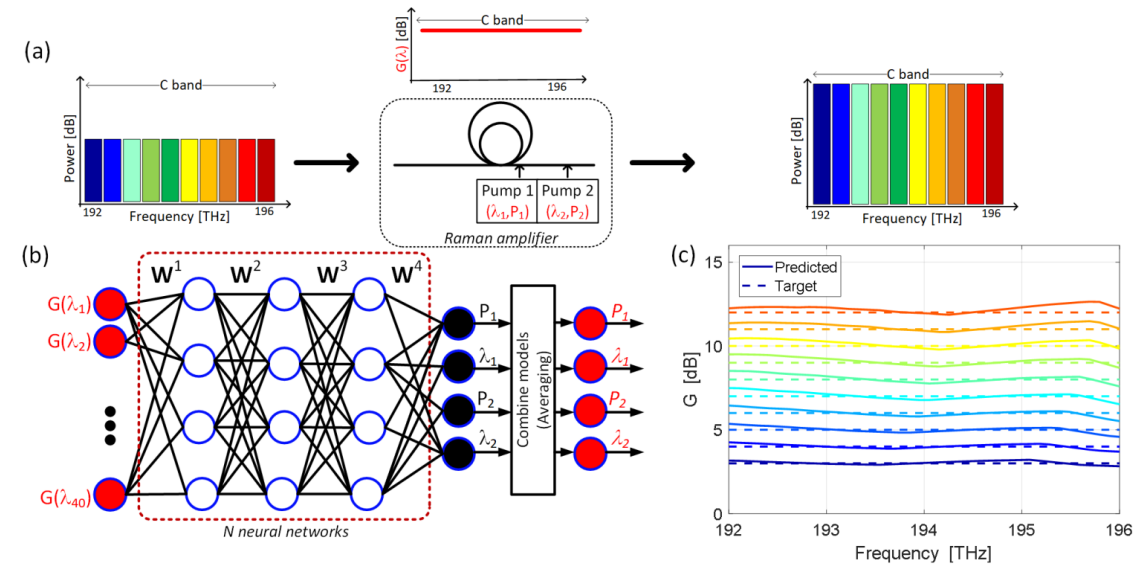
$$BER = \frac{N_{bits}^{err}(b_k, \tilde{b}_k)}{N_{bits}}$$

Применение методов МО в ВОЛС



Применение методов МО в ВОЛС

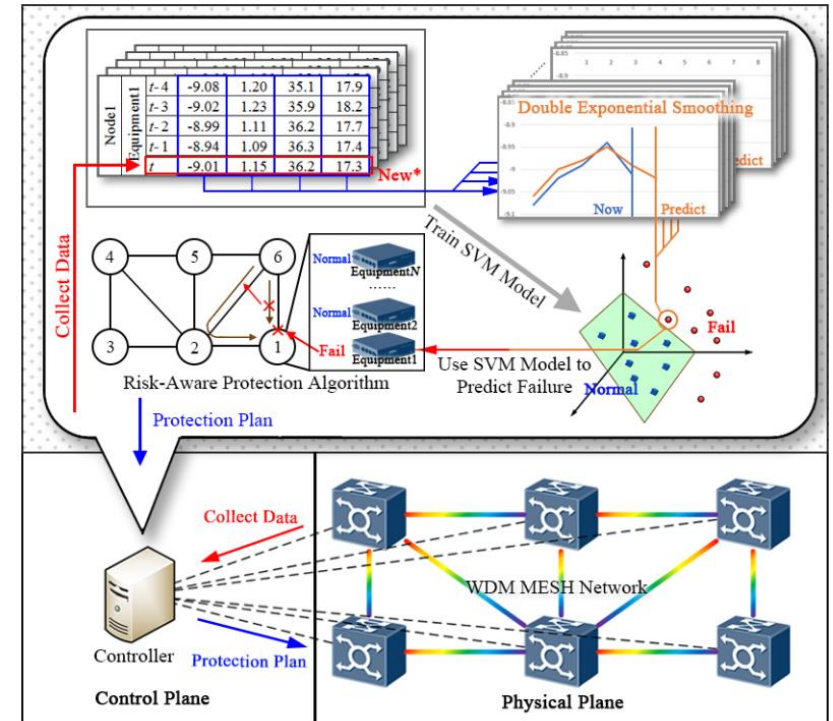
- **Оптимизация параметров широкополосного рамановского усилителя**
- Контроль системных сбоев в линиях связи
- Контроль OSNR с помощью eye-diagram
- Оптимизации формы сигнального созвездия (Geometric shaping)
- Оптимизация профиля сигнала
- Компенсация нелинейных искажений передачи
- Компенсация искажений компонент линий СВЯЗИ



Zibar, D., Brusin, A. M. R., de Moura, U. C., Da Ros, F., Curri, V., & Carena, A. (2019). Inverse system design using machine learning: the Raman amplifier case. *Journal of Lightwave Technology*, 38(4), 736-753.

Применение методов МО в ВОЛС

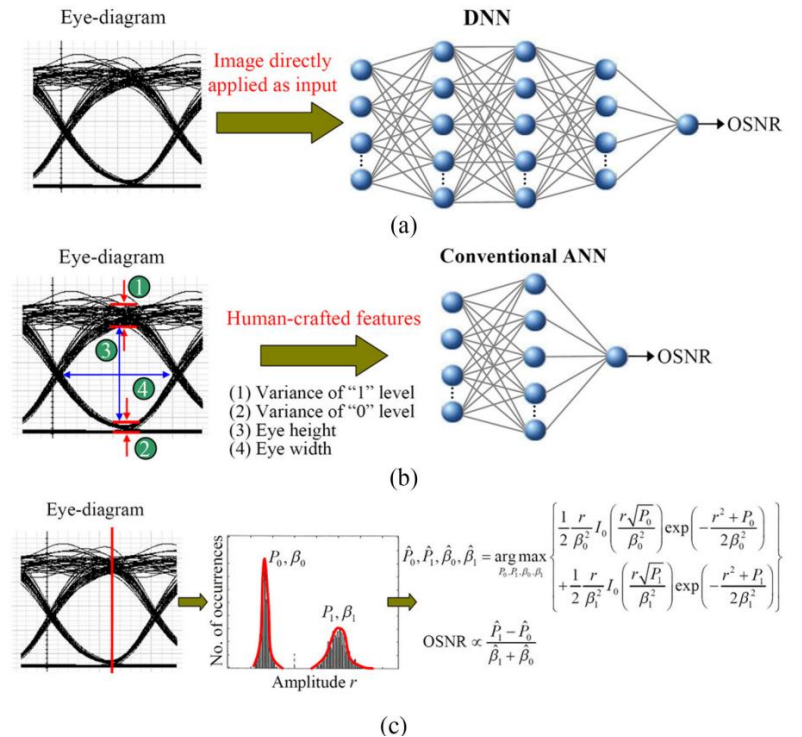
- Оптимизация параметров широкополосного рамановского усилителя
- **Контроль системных сбоев в линиях связи**
- Контроль OSNR с помощью eye-diagram
- Оптимизации формы сигнального созвездия (Geometric shaping)
- Оптимизация профиля сигнала
- Компенсация нелинейных искажений передачи
- Компенсация искажений компонент линий связи



Wang, Z., Zhang, M., Wang, D., Song, C., Liu, M., Li, J., ... & Liu, Z. (2017). Failure prediction using machine learning and time series in optical network. *Optics Express*, 25(16), 18553-18565.

Применение методов МО в ВОЛС

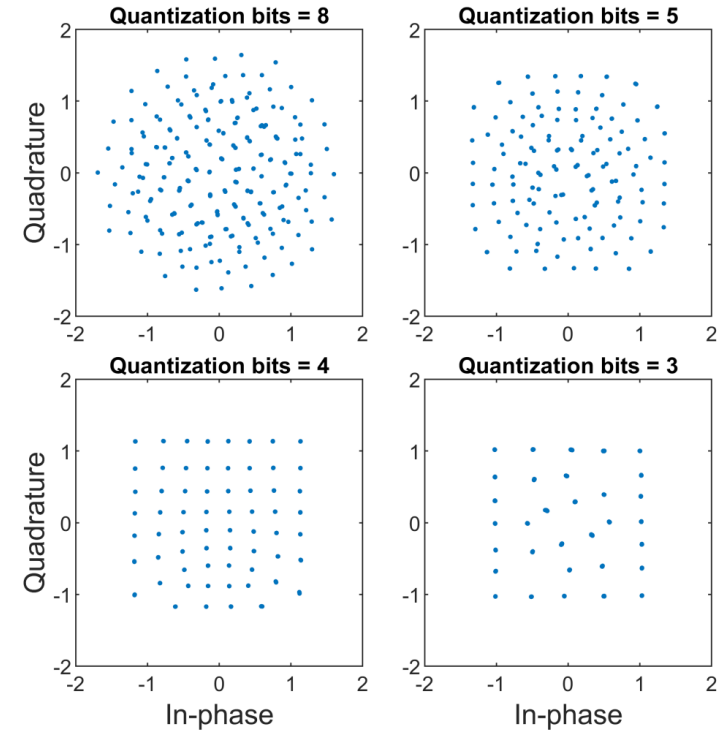
- Оптимизация параметров широкополосного рамановского усилителя
- Контроль системных сбоев в линиях связи
- **Контроль OSNR с помощью eye-diagram**
- Оптимизации формы сигнального созвездия (Geometric shaping)
- Оптимизация профиля сигнала
- Компенсация нелинейных искажений передачи
- Компенсация искажений компонент линий связи



Khan, F. N., Fan, Q., Lu, C., & Lau, A. P. T. (2019). An optical communication's perspective on machine learning and its applications. *Journal of Lightwave Technology*, 37(2), 493-516.

Применение методов МО в ВОЛС

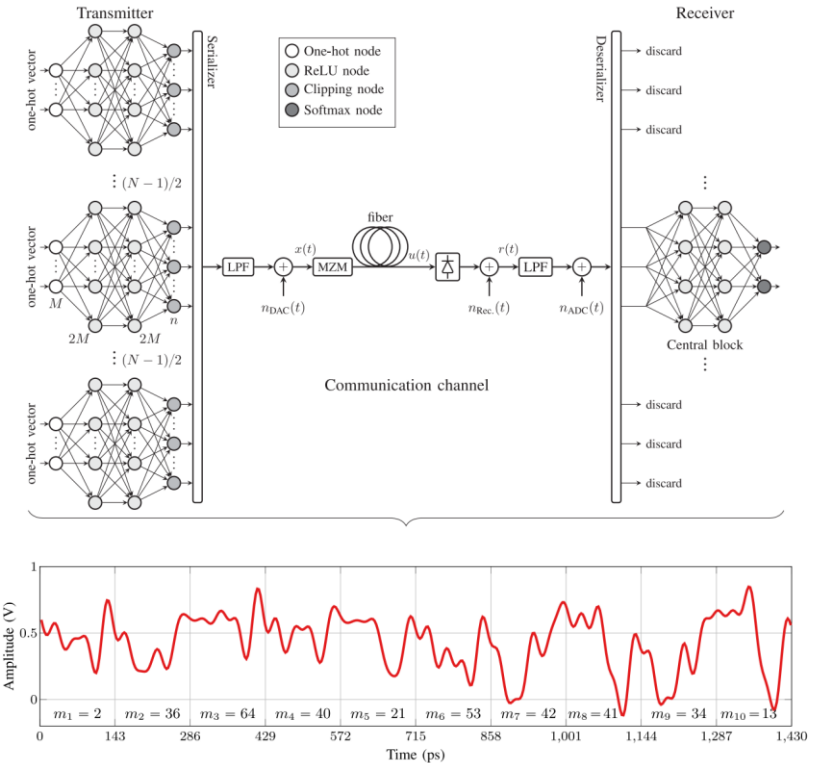
- Оптимизация параметров широкополосного рамановского усилителя
- Контроль системных сбоев в линиях связи
- Контроль OSNR с помощью eye-diagram
- **Оптимизации формы сигнального созвездия (Geometric shaping)**
- Оптимизация профиля сигнала
- Компенсация нелинейных искажений передачи
- Компенсация искажений компонент линий связи



Jovanovic, O., Da Ros, F., Zibar, D., & Yankov, M. P. (2023). Geometric constellation shaping for fiber-optic channels via end-to-end learning. *Journal of Lightwave Technology*.

Применение методов МО в ВОЛС

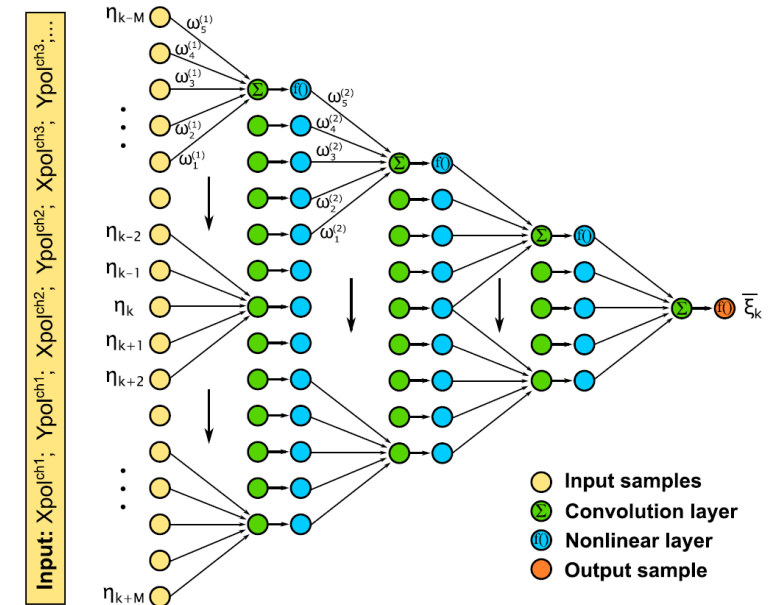
- Оптимизация параметров широкополосного рамановского усилителя
- Контроль системных сбоев в линиях связи
- Контроль OSNR с помощью eye-diagram
- Оптимизации формы сигнального созвездия (Geometric shaping)
- **Оптимизация профиля сигнала**
- Компенсация нелинейных искажений передачи
- Компенсация искажений компонент линий связи



Karanov, B., Chagnon, M., Thouin, F., Eriksson, T. A., Bülow, H., Lavery, D., ... & Schmalen, L. (2018). End-to-end deep learning of optical fiber communications. *Journal of Lightwave Technology*, 36(20), 4843-4855.

Применение методов МО в ВОЛС

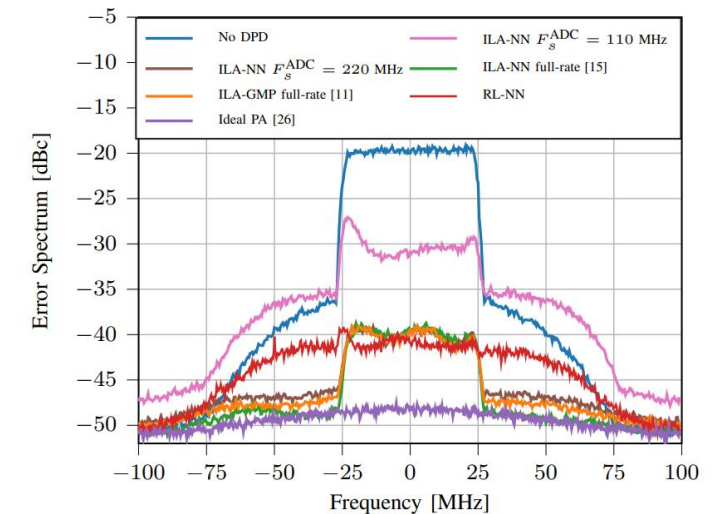
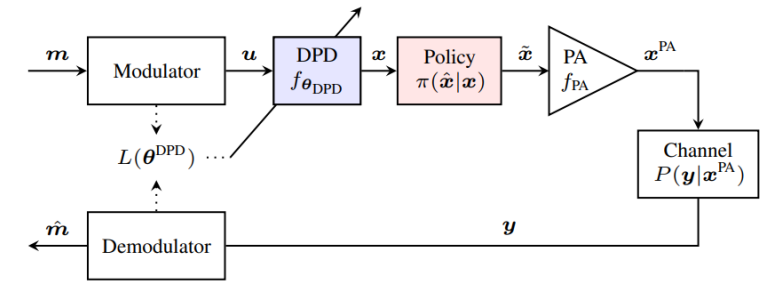
- Оптимизация параметров широкополосного рамановского усилителя
- Контроль системных сбоев в линиях связи
- Контроль OSNR с помощью eye-diagram
- Оптимизации формы сигнального созвездия (Geometric shaping)
- Оптимизация профиля сигнала
- **Компенсация нелинейных искажений передачи**
- Компенсация искажений компонент линий связи



Sidelnikov, O., Redyuk, A., Sygletos, S., Fedoruk, M., & Turitsyn, S. (2021). Advanced convolutional neural networks for nonlinearity mitigation in long-haul WDM transmission systems. *Journal of Lightwave Technology*, 39(8), 2397-2406.

Применение методов МО в ВОЛС

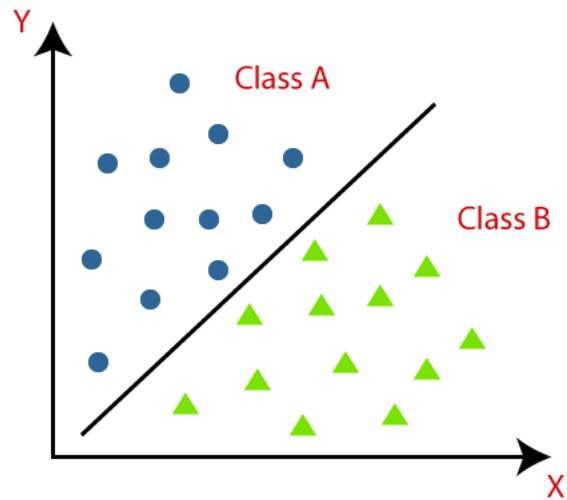
- Оптимизация параметров широкополосного рамановского усилителя
- Контроль системных сбоев в линиях связи
- Контроль OSNR с помощью eye-diagram
- Оптимизации формы сигнального созвездия (Geometric shaping)
- Оптимизация профиля сигнала
- Компенсация нелинейных искажений передачи
- **Компенсация искажений компонент линий связи**



Wu, Y., Song, J., Häger, C., Gustavsson, U., i Amat, A. G., & Wymeersch, H. (2022, May). Symbol-based over-the-air digital predistortion using reinforcement learning. In ICC 2022-IEEE International Conference on Communications (pp. 2615-2620). IEEE.

Применение МО для компенсации искажений

Методы классификации



Применение МО для компенсации искажений

Методы классификации

Fiber Nonlinearity Equalizer Based on Support Vector Classification for Coherent Optical OFDM

Tu Nguyen,^{1,4} Sofien Mhatli,² Elias Giacoumidis,³ Ludo Van Compernelle,⁴ Marc Wuilpart,¹ and Patrice Mégret¹

¹Faculté Polytechnique—Université de Mons, 7000 Mons, Belgium
²SERCOM-Laboratory, EPT Université de Carthage, Tunis 2078, Tunisia
³Centre for Ultrahigh bandwidth Devices for Optical Systems (CUDOS) and Institute of Photonics and Optical Science (IPOS), School of Physics, University of Sydney, Sydney, NSW 2006, Australia
⁴Proximus SA, 1030 Bruxelles, Belgium

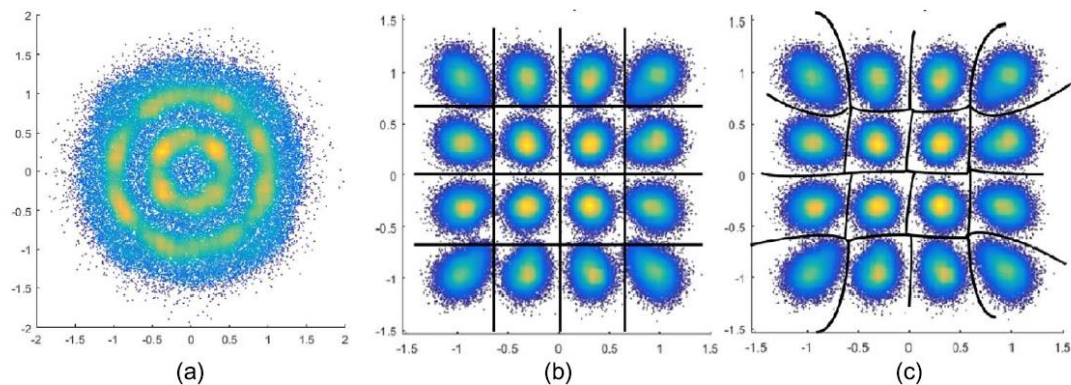


Fig. 2. Received constellation at the launched power of -6 dBm for a transmission distance of 1000 km. (a) Before CD compensation, (b) after CD compensation with hard decision boundaries, and (c) after SVM-NLE with nonlinear boundaries.

Nonlinearity Mitigation Using a Machine Learning Detector Based on k -Nearest Neighbors

Danshi Wang, Min Zhang, Meixia Fu, Zhongle Cai, Ze Li, Huanhuan Han, Yue Cui, and Bin Luo

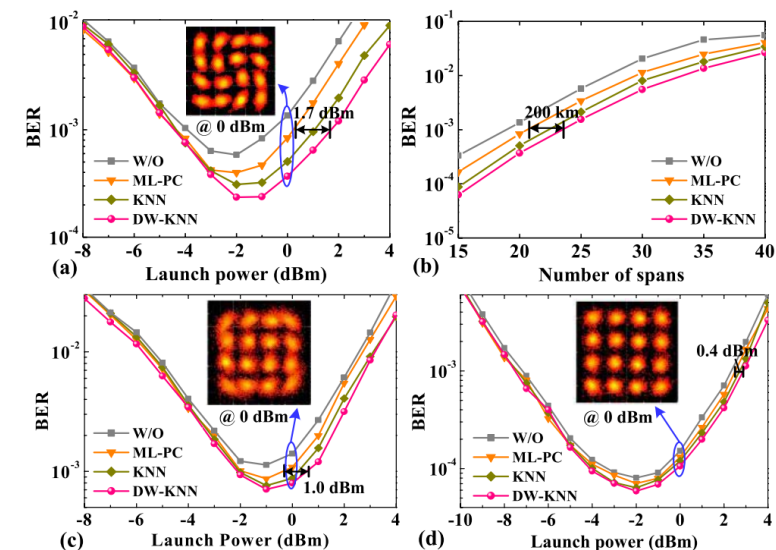
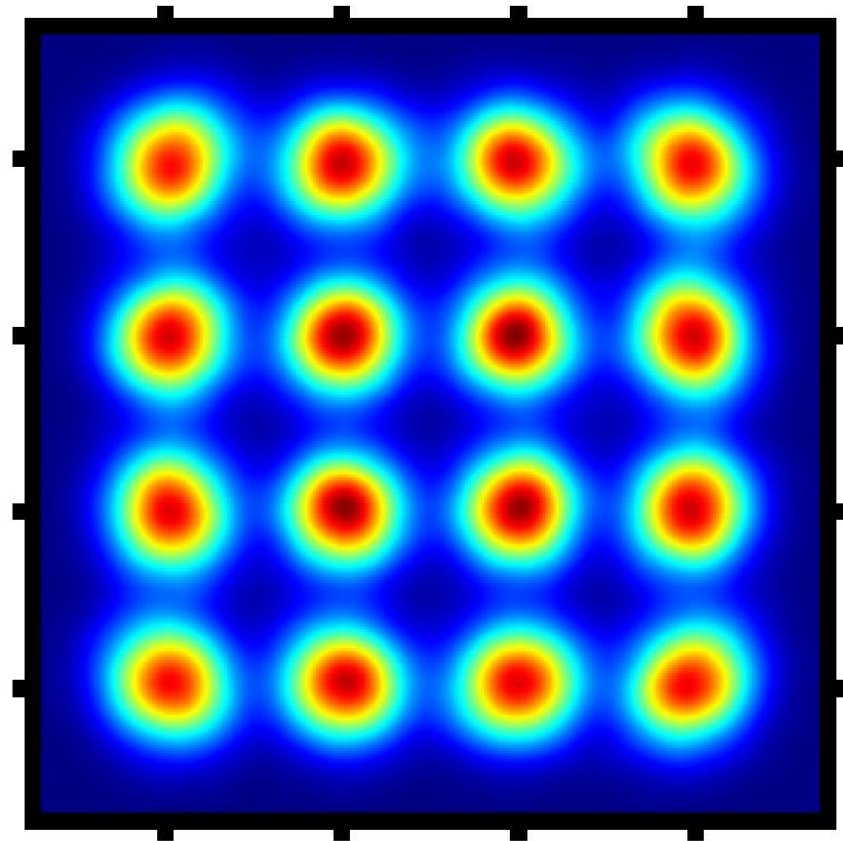
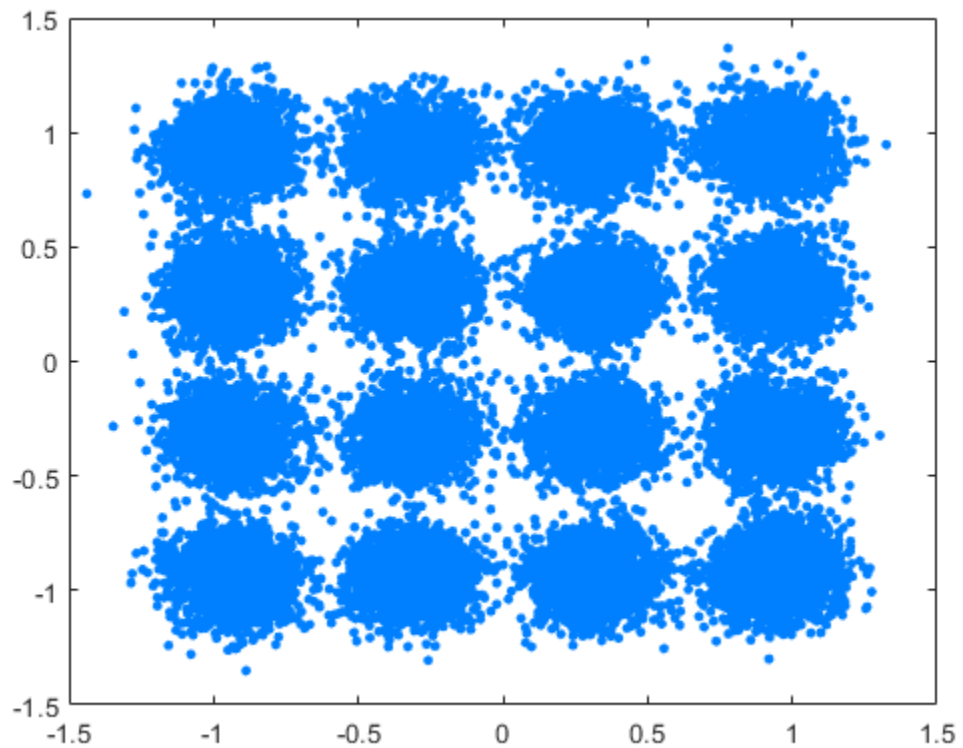


Fig. 4. BER as a function of (a) launch power (zero-dispersion link, fiber length = 1600 km), (b) transmission distance (zero-dispersion link, launch power = 0 dBm), (c) launch power (dispersion managed link, fiber length = 1200 km), and (d) launch power (dispersion unmanaged link, fiber length = 1200 km).

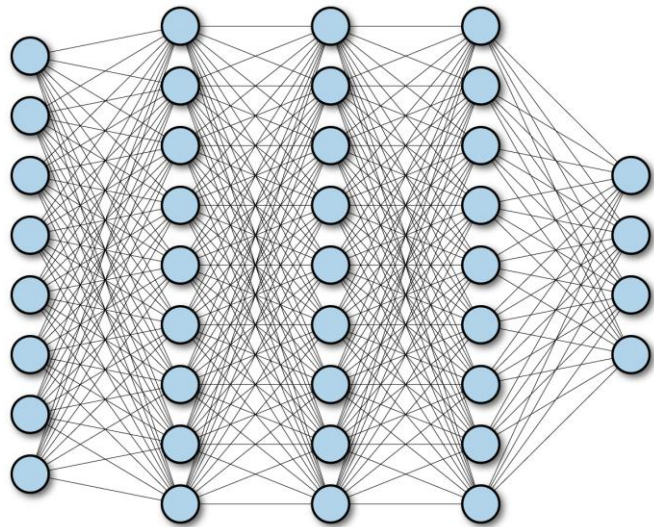
Применение МО для компенсации искажений

Методы классификации



Применение МО для компенсации искажений

Полносвязные нейронные сети



$$y = \sigma(Wx)$$

Применение МО для компенсации искажений

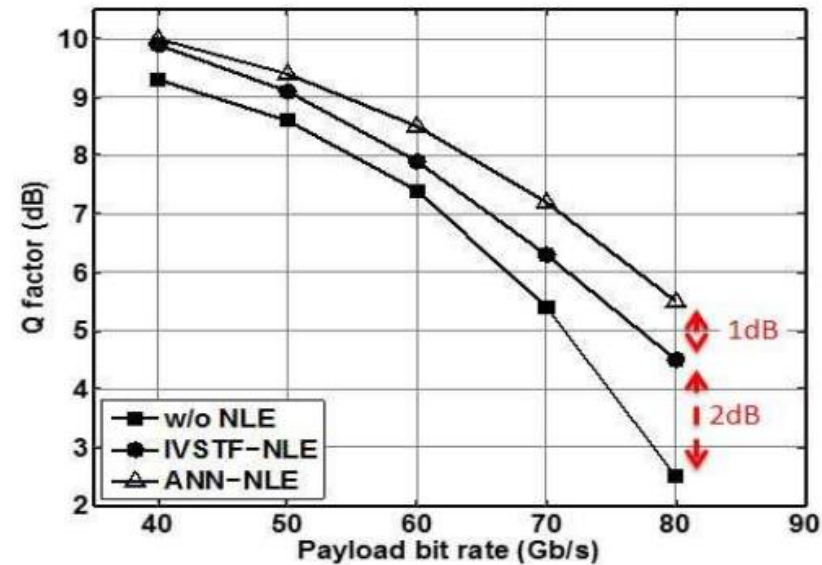
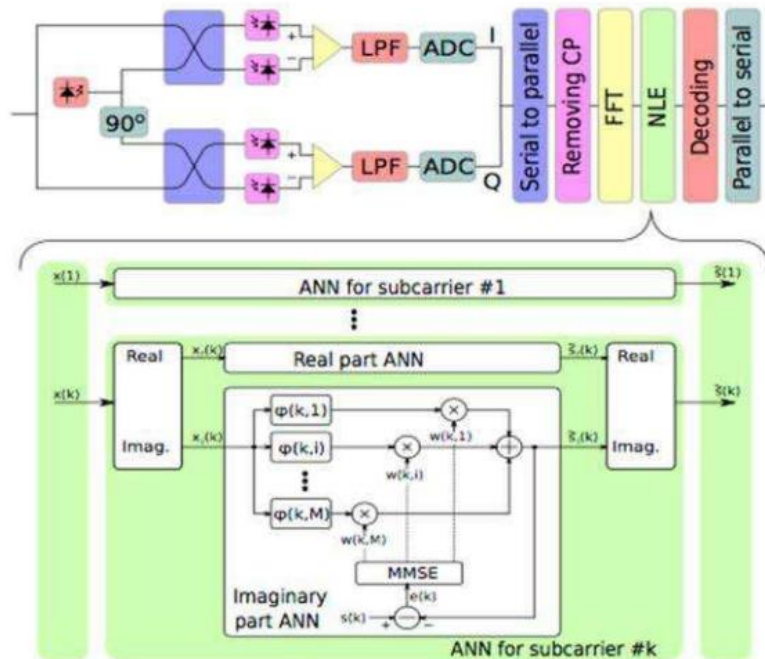
Полносвязные нейронные сети

IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 27, NO. 4, FEBRUARY 15, 2015

387

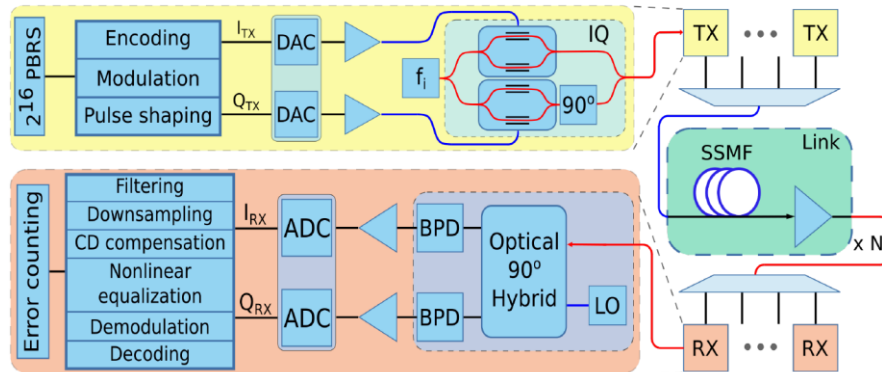
Artificial Neural Network Nonlinear Equalizer for Coherent Optical OFDM

Mutsam A. Jarajreh, Elias Giacoumidis, Ivan Aldaya, Son Thai Le, Athanasios Tsokanos, Zabih Ghassemlooy, and Nick J. Doran



Применение МО для компенсации искажений

Полносвязные нейронные сети

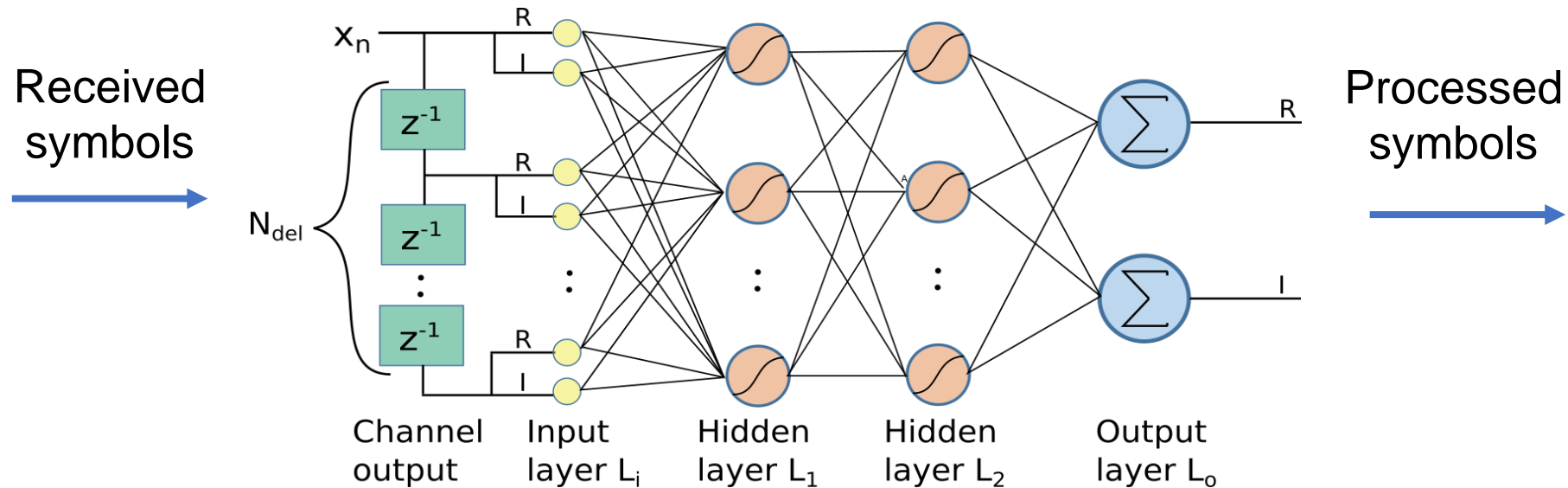


16QAM
 32 Gbaud
 100G
 5 каналов
 2000 км

Equalization performance and complexity analysis of dynamic deep neural networks in long haul transmission systems

OLEG SIDELNIKOV,^{1,2,*} ALEXEY REDYUK,^{1,2} AND STYLIANOS SYGLETOS³

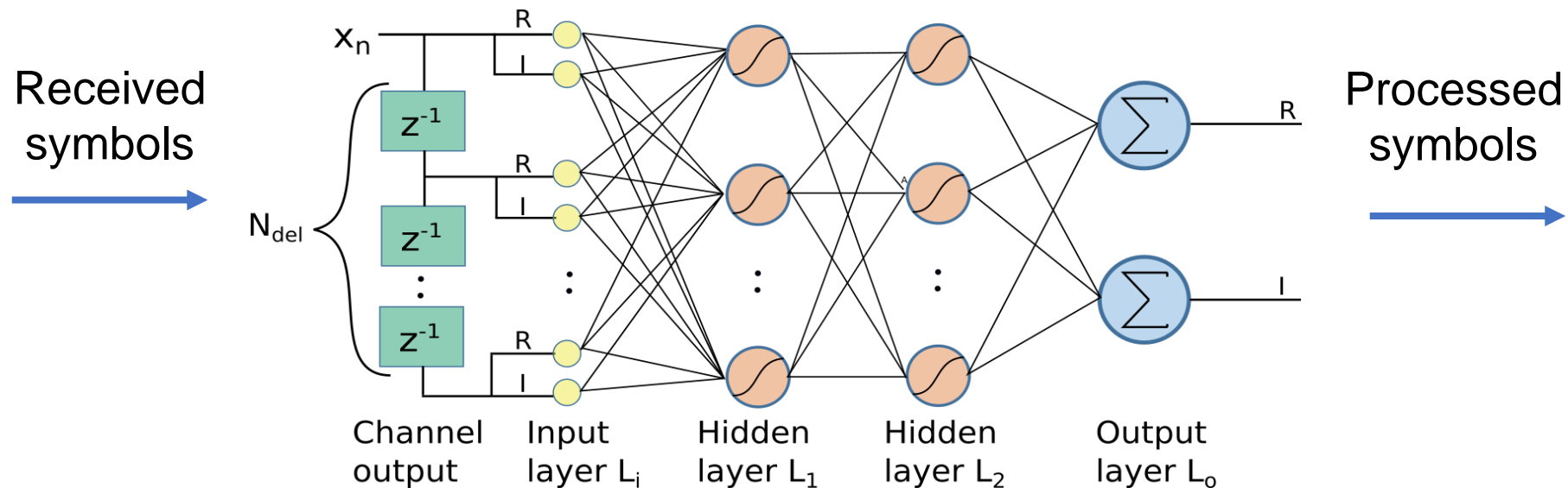
¹Institute of Computational Technologies SB RAS, Novosibirsk, Russia
²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia
³Aston Institute of Photonic Technologies, Aston University, Birmingham, UK
 *o.sidelnikov@gmail.com



Применение МО для компенсации искажений

Полносвязные нейронные сети

- 1 канал, 1 поляризация.
- Действительные и мнимые части принятых символов подаются как единый вектор.
- Для учета эффекта памяти канал используются блоки задержки.
- Выходной слой состоит из 2 нейронов.
- Функция активации - гиперболический тангенс.



Equalization performance and complexity analysis of dynamic deep neural networks in long haul transmission systems

OLEG SIDELNIKOV,^{1,2,*} ALEXEY REDYUK,^{1,2} AND STYLIANOS SYGLETOS³

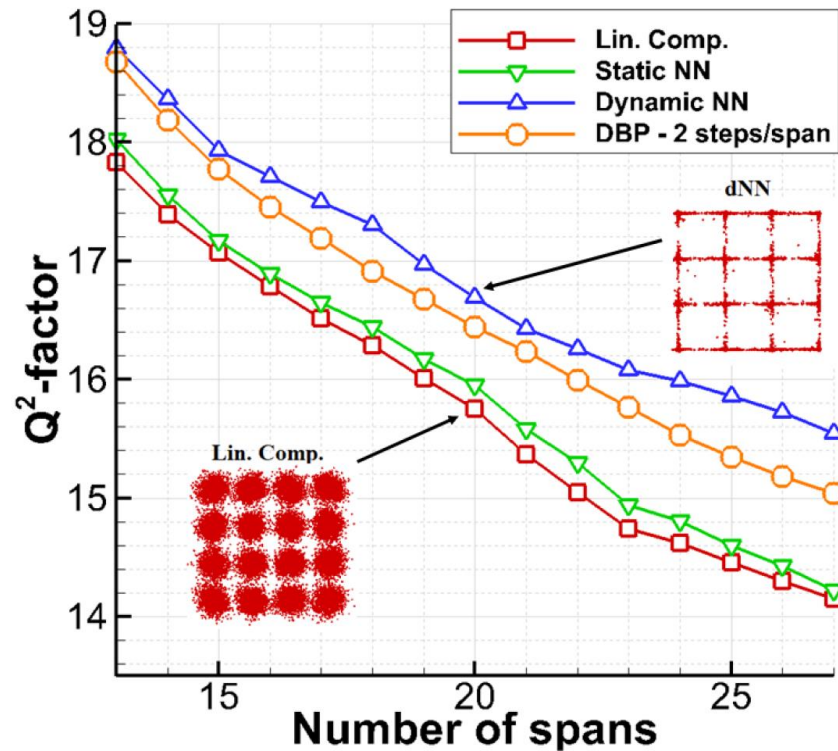
¹Institute of Computational Technologies SB RAS, Novosibirsk, Russia

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

³Aston Institute of Photonic Technologies, Aston University, Birmingham, UK
*o.s.sidelnikov@gmail.com

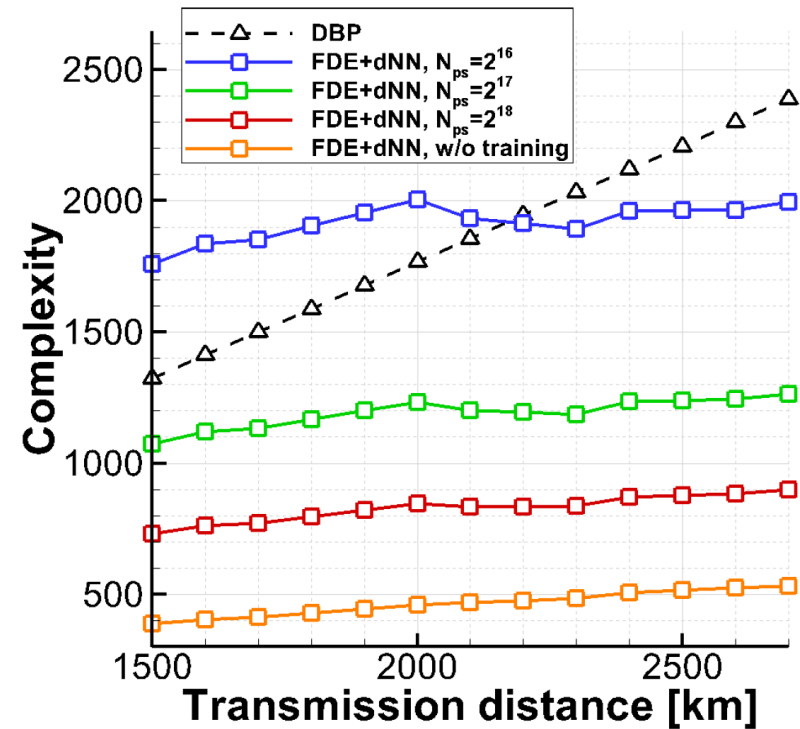
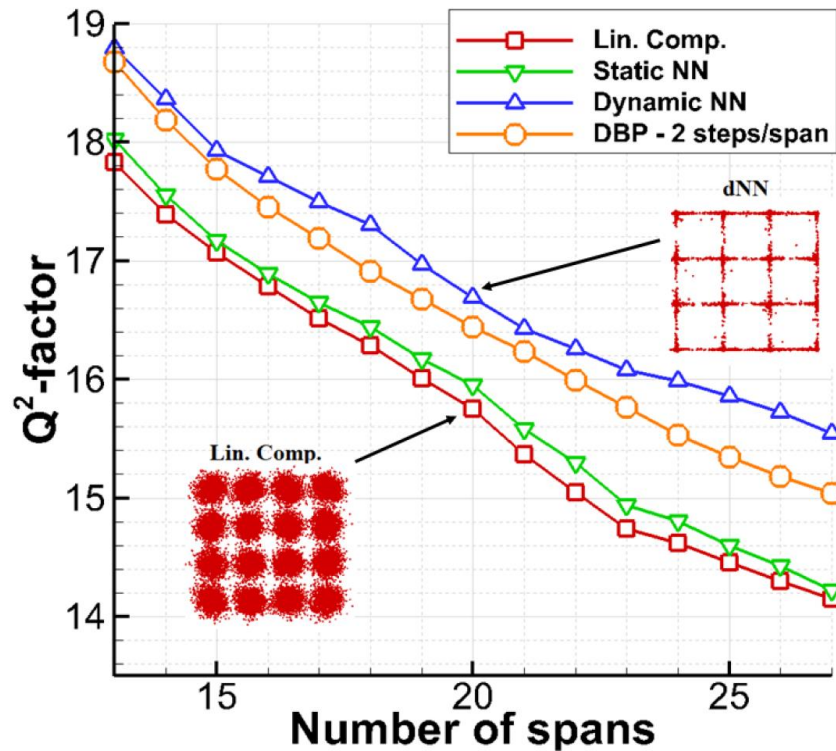
Применение МО для компенсации искажений

Полносвязные нейронные сети



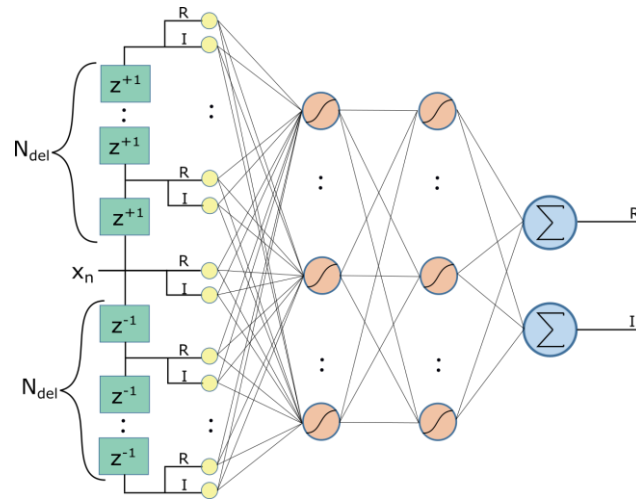
Применение МО для компенсации искажений

Полносвязные нейронные сети



Применение МО для компенсации искажений

Полносвязные нейронные сети



ВКВ0-2019- ВОСПИ

МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Сидельников О.С.^{1*}, Редюк А.А.^{1,2}, Стилланос С.³, Федорук М.П.^{1,2}

¹Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск

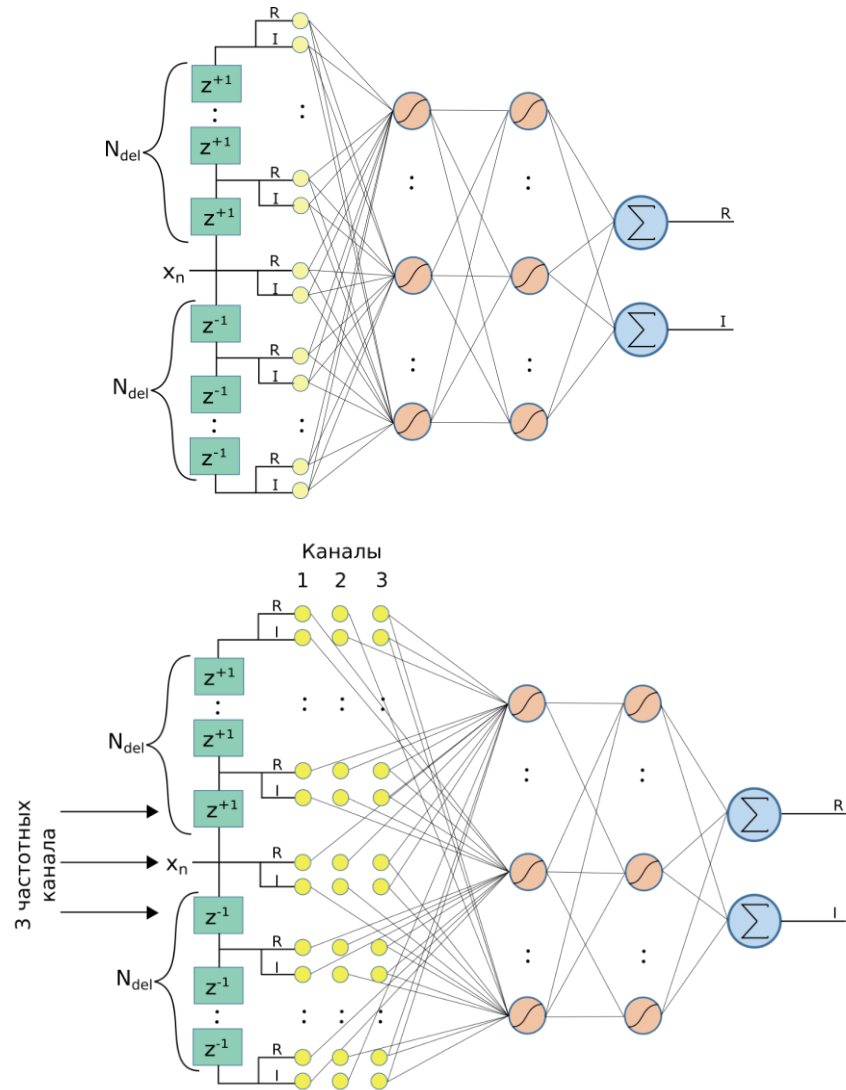
²Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск

³Институт фотонных технологий, университет Астона, г. Бирмингем, Великобритания

*E-mail: o.s.sidelnikov@gmail.com

Применение МО для компенсации искажений

Полносвязные нейронные сети



ВКВ0-2019- ВОСПИ

МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Сидельников О.С.^{1*}, Редюк А.А.^{1,2}, Стилланос С.³, Федорук М.П.^{1,2}

¹Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск

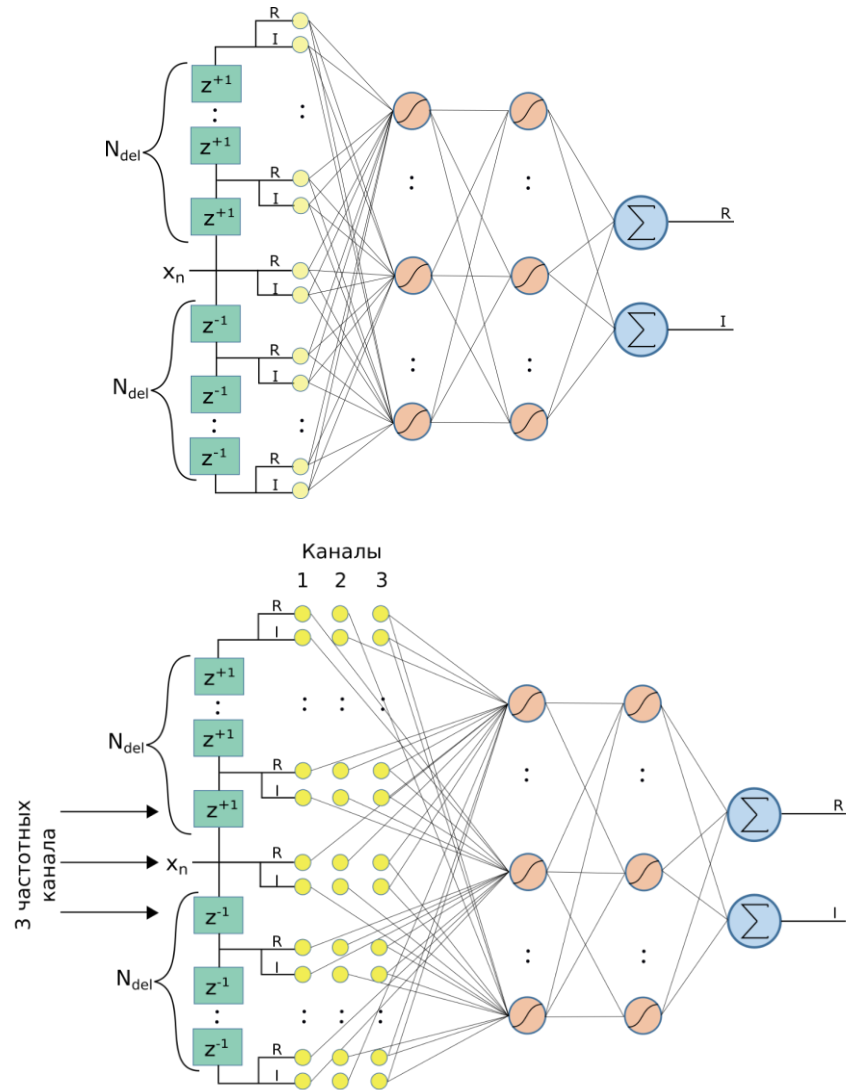
²Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск

³Институт фотонных технологий, университет Астона, г. Бирмингем, Великобритания

*E-mail: o.s.sidelnikov@gmail.com

Применение МО для компенсации искажений

Полносвязные нейронные сети



ВКВ0-2019- ВОСПИ

МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ В МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

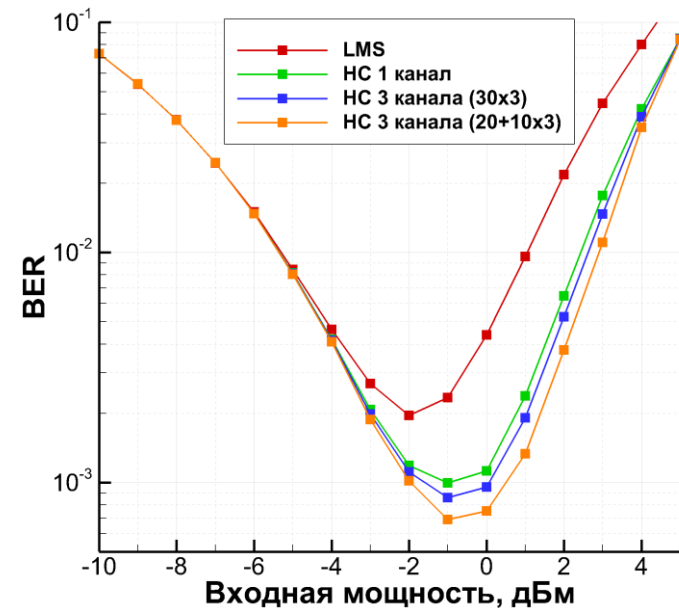
Сидельников О.С.^{1*}, Редюк А.А.^{1,2}, Стилианос С.³, Федорук М.П.^{1,2}

¹Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск

²Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск

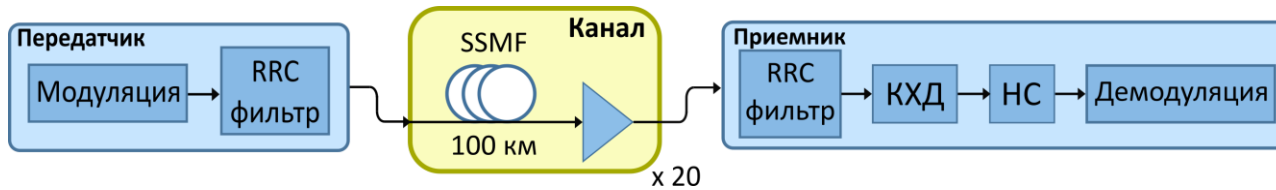
³Институт фотонных технологий, университет Астона, г. Бирмингем, Великобритания

*E-mail: o.s.sidelnikov@gmail.com



Применение МО для компенсации искажений

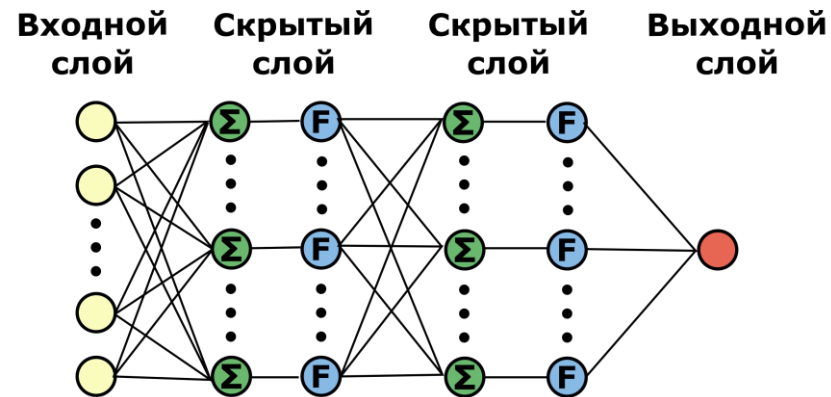
Полносвязные нейронные сети



16QAM, 32 Gbaud, 100G, 1 канал, 2000 км

Применение комплексных полносвязных нейронных сетей для компенсации нелинейных эффектов в волоконно-оптических линиях связи

С.А.Богданов, О.С.Сидельников



⊕ Полносвязный слой

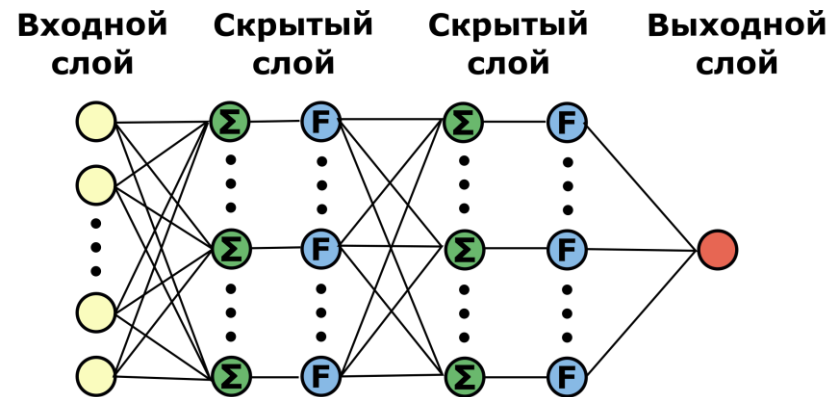
⊖ Нелинейный слой

Применение МО для компенсации искажений

Полносвязные нейронные сети

- Полносвязная **комплекснозначная** нейронная сеть.
- 1 канал, 1 поляризация.
- Для учета памяти канала подавались N его предыдущих и N последующих символов.
- Функция активация:

$$f(z) = e^{i\gamma|z|^2} z, \text{ где } \gamma - \text{обучаемый параметр}$$



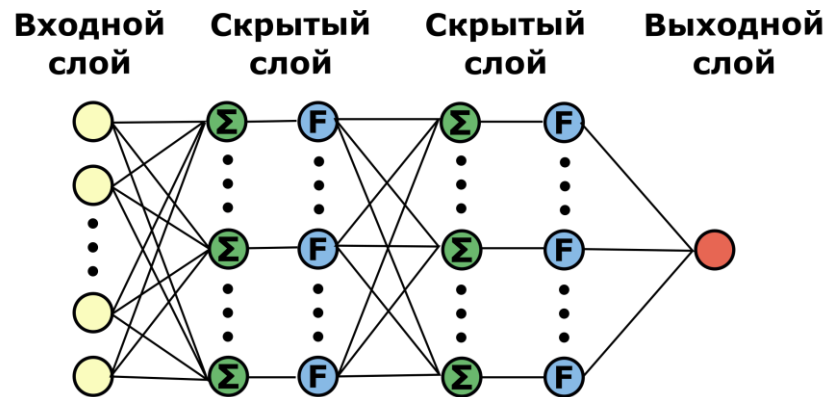
⊕ Полносвязный слой ⊖ Нелинейный слой

Применение МО для компенсации искажений

Полносвязные нейронные сети

- Полносвязная **комплекснозначная** нейронная сеть.
- 1 канал, 1 поляризация.
- Для учета памяти канала подавались N его предыдущих и N последующих символов.
- Функция активация:

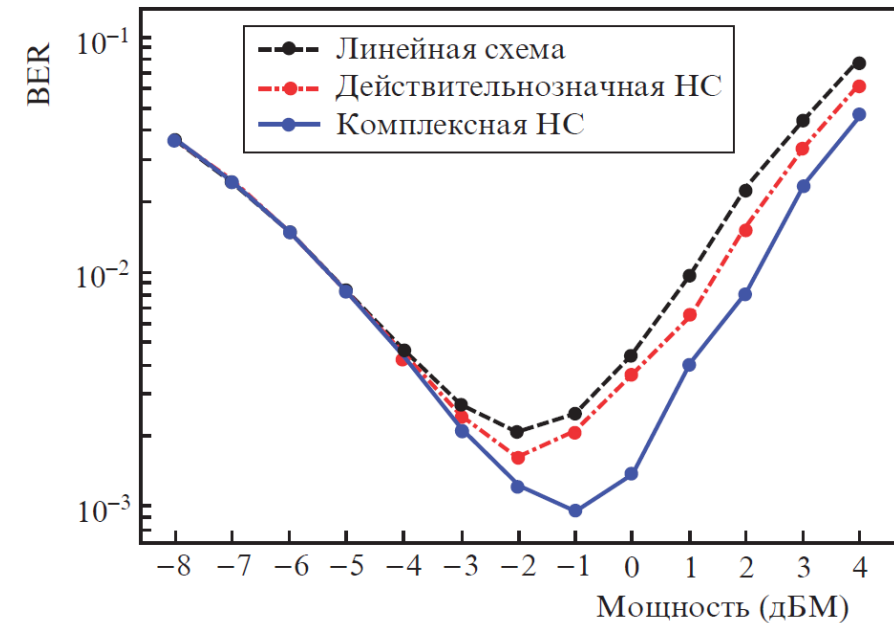
$f(z) = e^{i\gamma|z|^2} z$, где γ – обучаемый параметр



⊕ Полносвязный слой ⊖ Нелинейный слой

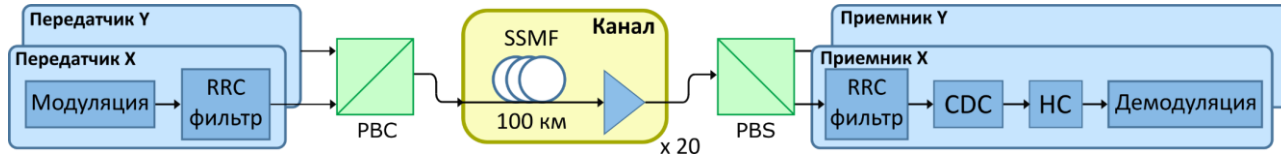
Применение комплексных полносвязных нейронных сетей для компенсации нелинейных эффектов в волоконно-оптических линиях связи

С.А.Богданов, О.С.Сидельников

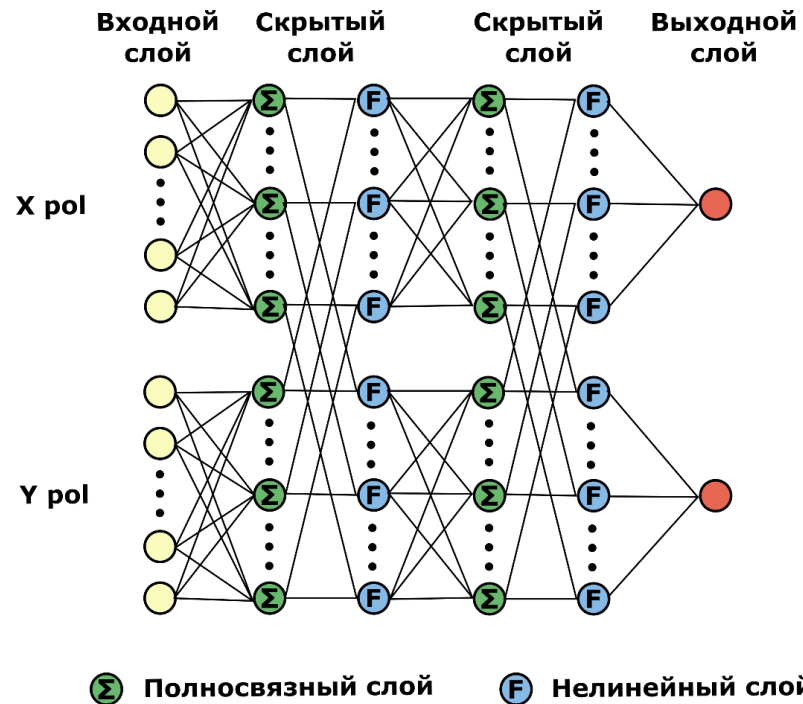


Применение МО для компенсации искажений

Полносвязные нейронные сети



16QAM, 32 Gbaud, 200G, 1 канал, 2000 км



1076

ke@lebedev.ru – <http://www.quantum-electron.ru>

«Квантовая электроника», 51, № 12 (2021)

Применение комплексных полносвязных нейронных сетей для компенсации нелинейности в волоконно-оптических линиях связи с поляризационным уплотнением каналов

С.А.Богданов, О.С.Сидельников, А.А.Редюк

Применение МО для компенсации искажений

Полносвязные нейронные сети

1076

ke@lebedev.ru – <http://www.quantum-electron.ru>

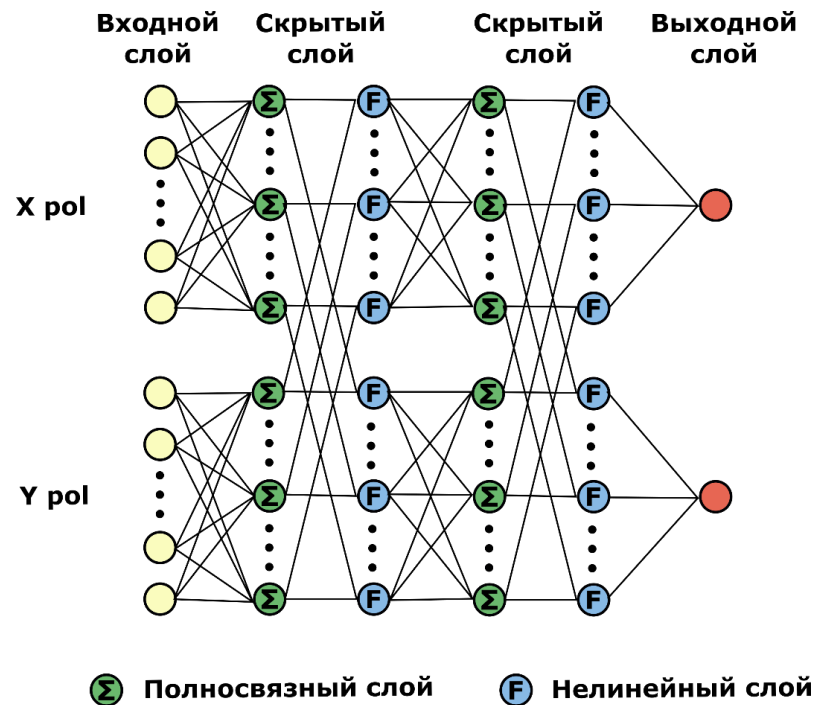
«Квантовая электроника», 51, № 12 (2021)

- 1 канал, 2 поляризации.
- Функция активация:

$f(z_{x|y}) = e^{i(\gamma_1|z_x|^2 + \gamma_2|z_y|^2)} z_{x|y}$, где γ_1, γ_2 – обучаемые параметры

Применение комплексных полносвязных нейронных сетей для компенсации нелинейности в волоконно-оптических линиях связи с поляризационным уплотнением каналов

С.А.Богданов, О.С.Сидельников, А.А.Редюк

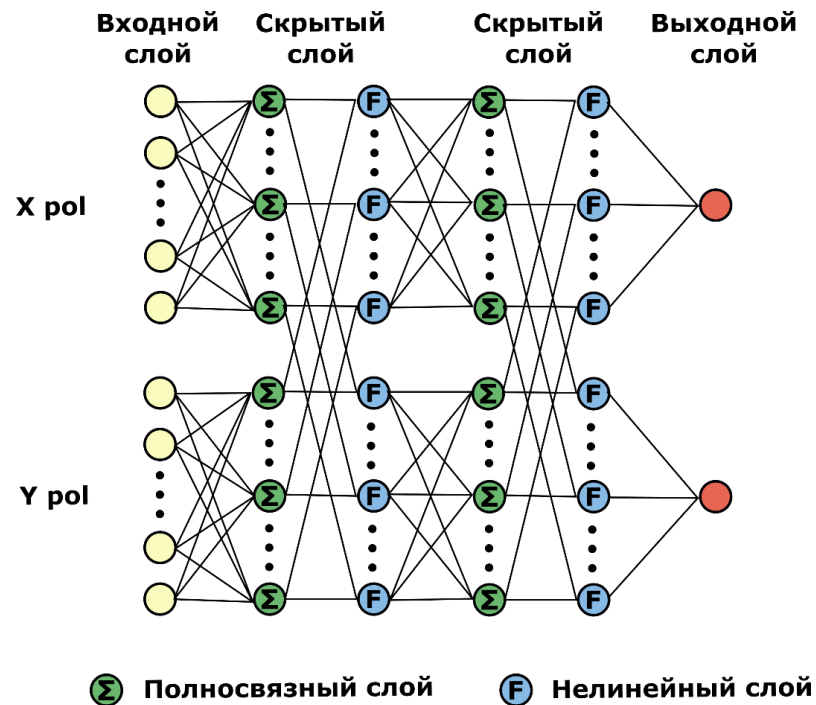


Применение МО для компенсации искажений

Полносвязные нейронные сети

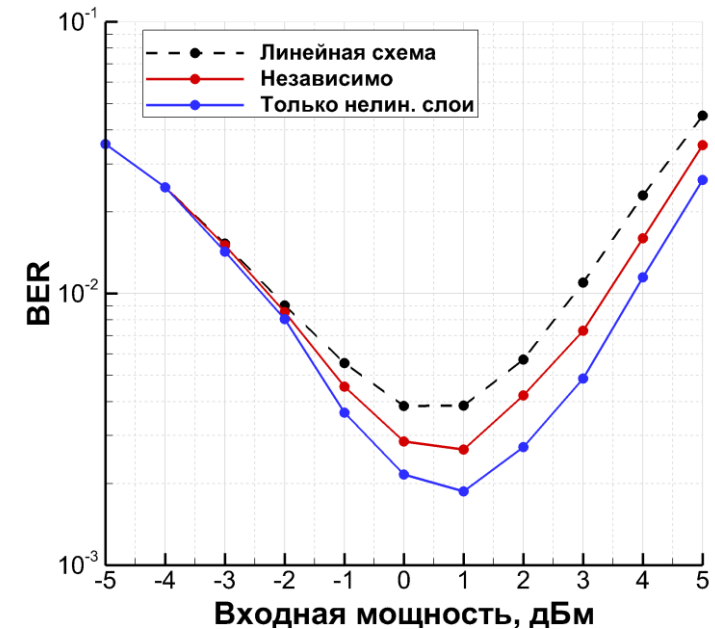
- 1 канал, 2 поляризации.
- Функция активация:

$$f(z_{x|y}) = e^{i(\gamma_1|z_x|^2 + \gamma_2|z_y|^2)} z_{x|y}, \text{ где } \gamma_1, \gamma_2 \text{ – обучаемые параметры}$$



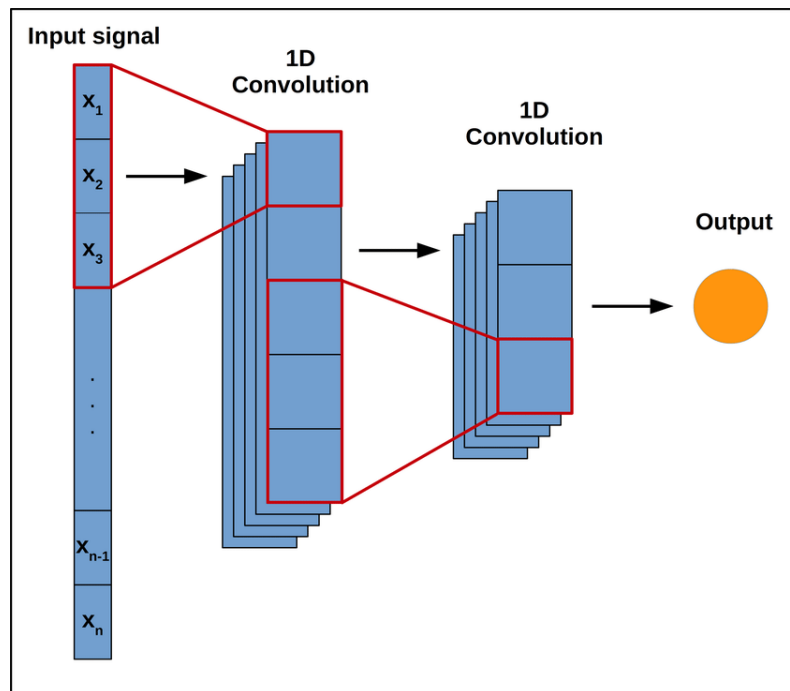
Применение комплексных полносвязных нейронных сетей для компенсации нелинейности в волоконно-оптических линиях связи с поляризационным уплотнением каналов

С.А.Богданов, О.С.Сидельников, А.А.Редюк



Применение МО для компенсации искажений

Свёрточные нейронные сети



$$y = \sigma(f * x)$$

Применение МО для компенсации искажений

Learned DBP

W3A.4.pdf

OFC 2018 © OSA 2018

Nonlinear Interference Mitigation via Deep Neural Networks

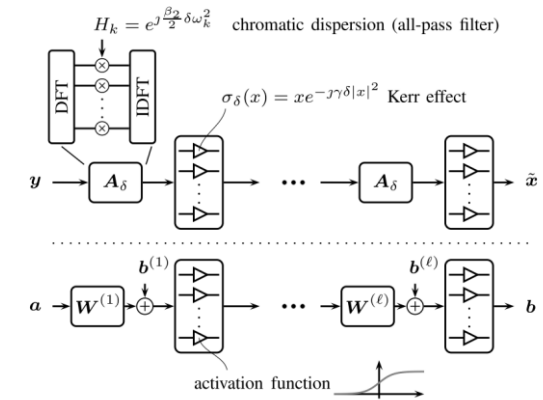
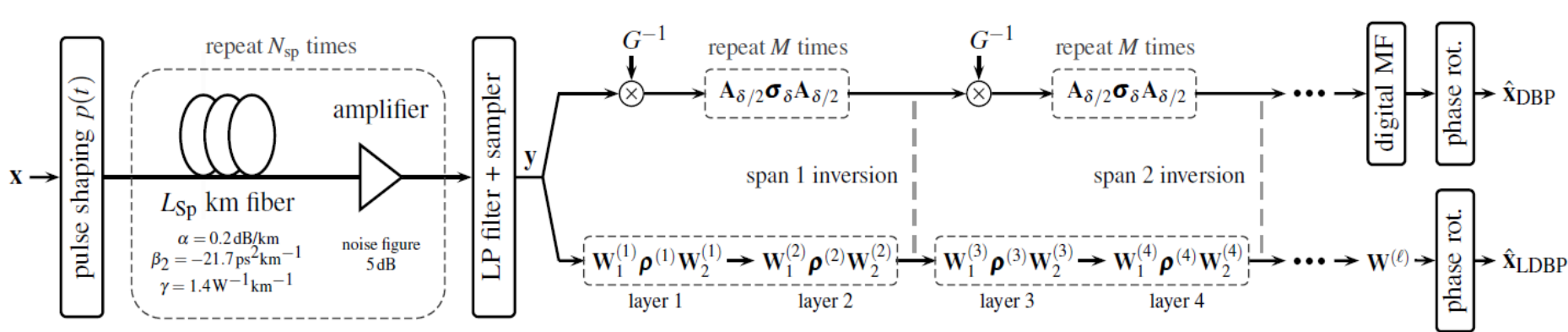
Christian Häger^(1,2) and Henry D. Pfister⁽²⁾

⁽¹⁾Department of Electrical Engineering, Chalmers University of Technology, SE-41296 Göteborg, Sweden,

⁽²⁾Department of Electrical and Computer Engineering, Duke University, Durham, NC, 27708, US

(e-mail: christian.haeger@chalmers.se, henry.pfister@duke.edu)

$$\mathbf{A} = \mathbf{W}^{-1} \text{diag}(H_1, \dots, H_n) \mathbf{W} \quad \sigma_z(x) = x e^{-j\gamma z |x|^2}$$



$$\rho^{(i)}(x) = x e^{-j\alpha_i |x|^2}$$

Применение МО для компенсации искажений

Learned DBP

W3A.4.pdf

OFC 2018 © OSA 2018

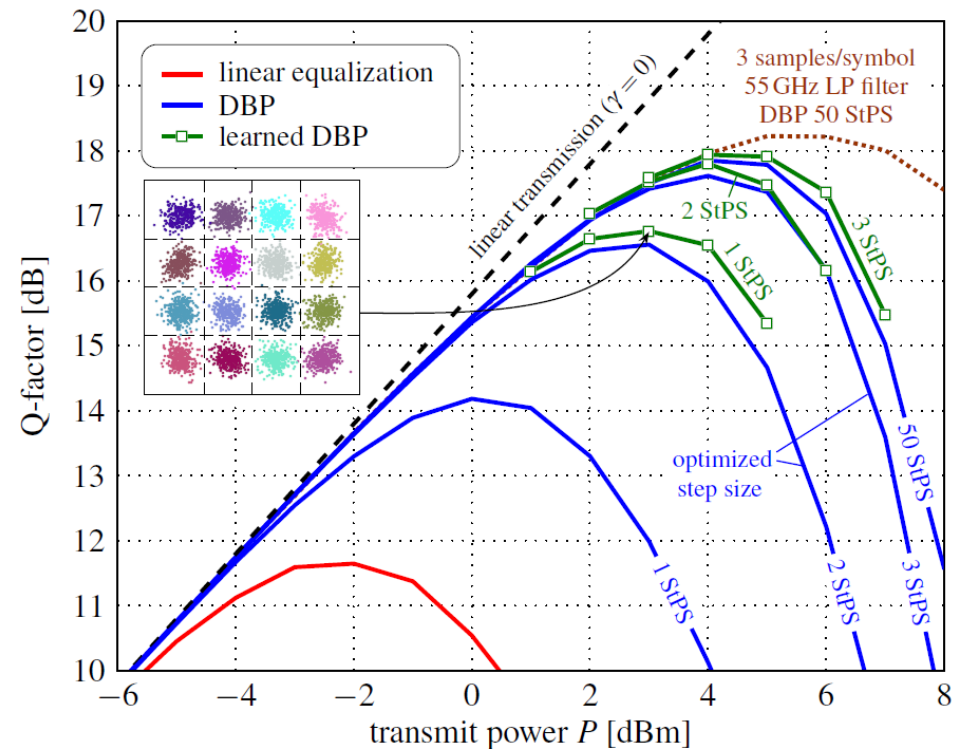
Nonlinear Interference Mitigation via Deep Neural Networks

Christian Häger^(1,2) and Henry D. Pfister⁽²⁾

⁽¹⁾Department of Electrical Engineering, Chalmers University of Technology, SE-41296 Göteborg, Sweden,

⁽²⁾Department of Electrical and Computer Engineering, Duke University, Durham, NC, 27708, US

(e-mail: christian.haeger@chalmers.se, henry.pfister@duke.edu)



Применение МО для компенсации искажений

Свёрточные нейронные сети

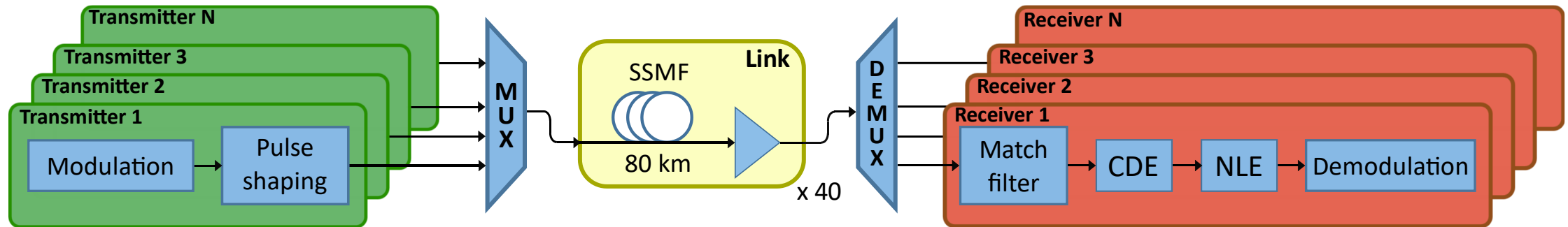
JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 39, NO. 8, APRIL 15, 2021

2397

Advanced Convolutional Neural Networks for Nonlinearity Mitigation in Long-Haul WDM Transmission Systems

Oleg Sidelnikov^{ORCID}, Alexey Redyuk^{ORCID}, Stylianos Sygletos, Mikhail Fedoruk, and Sergei Turitsyn^{ORCID}, *Fellow, OSA*

16QAM, 64 Gbaud, 400G, 11 каналов, 3200 км



Применение МО для компенсации искажений

Свёрточные нейронные сети

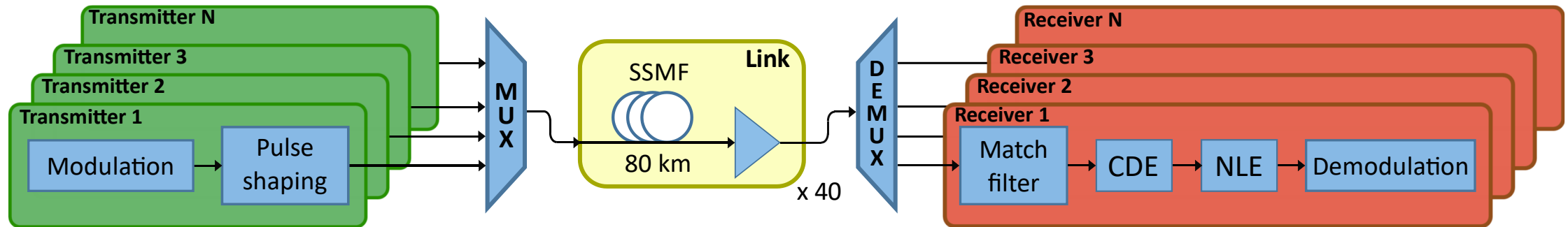
JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 39, NO. 8, APRIL 15, 2021

2397

Advanced Convolutional Neural Networks for Nonlinearity Mitigation in Long-Haul WDM Transmission Systems

Oleg Sidelnikov^{ORCID}, Alexey Redyuk^{ORCID}, Stylianos Sygletos, Mikhail Fedoruk, and Sergei Turitsyn^{ORCID}, *Fellow, OSA*

16QAM, 64 Gbaud, 400G, 11 каналов, 3200 км

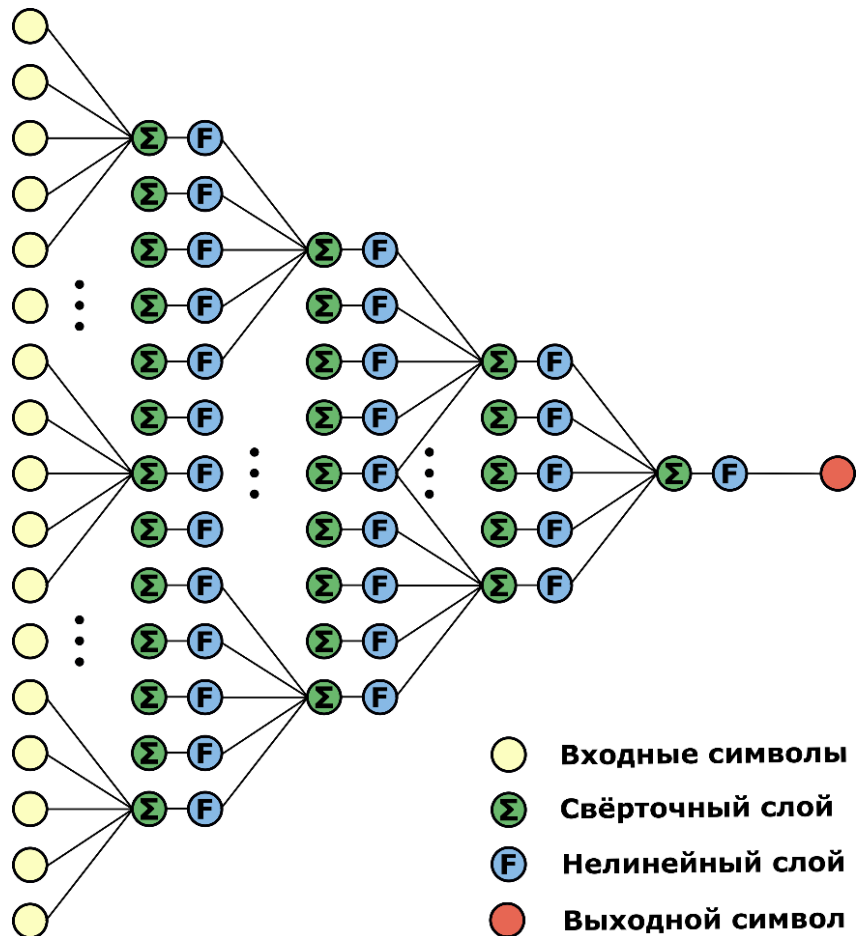


Связанные нелинейные уравнения Шредингера (CNLSE):

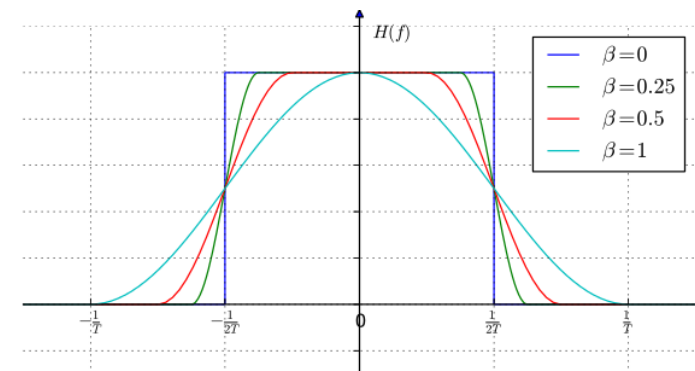
$$\frac{\partial A_c^{x|y}}{\partial z} = -d_c \frac{\partial A_c^{x|y}}{\partial t} - \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_c^{x|y}}{\partial t^2} + i \frac{8\gamma}{9} \left(|A_c^x|^2 + |A_c^y|^2 + 2 \sum_{s \neq c} (|A_s^x|^2 + |A_s^y|^2) \right) A_c^{x|y}$$

Применение МО для компенсации искажений

Свёрточные нейронные сети



- Комплекснозначная нейронная сеть
- 1 шаг на пролет
- На вход подаются данные с 1 отсчетом на символ
- Восстановление дисперсионного уширения сигнала



- Каналы и поляризации обрабатываются параллельно

Применение МО для компенсации искажений Свёрточные нейронные сети. Линейные слои

W1G.4.pdf

OFC 2017 © OSA 2017

Time-Domain Digital Back Propagation: Algorithm and Finite-Precision Implementation Aspects

Christoffer Fougstedt¹, Mikael Mazur², Lars Svensson¹, Henrik Eliasson², Magnus Karlsson²,
and Per Larsson-Edefors¹

¹Dept. of Computer Science and Engineering, ²Dept. of Microtechnology and Nanoscience,
Chalmers University of Technology, SE-412 96 Göteborg, Sweden
chrjou@chalmers.se

$$A(z + \Delta z, t) = (A(z, t) * h_{CDC}(\Delta z)) \cdot \exp((\alpha \Delta z)/2) \cdot \exp(-j \Delta z \gamma |A|^2),$$

5110

JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 34, NO. 22, NOVEMBER 15, 2016

Dispersion Compensation FIR Filter With Improved Robustness to Coefficient Quantization Errors

Alireza Sheikh, *Student Member, IEEE*, Christoffer Fougstedt, *Student Member, IEEE*,
Alexandre Graell i Amat, *Senior Member, IEEE*, Pontus Johannisson, *Member, IEEE*,
Per Larsson-Edefors, *Senior Member, IEEE*, and Magnus Karlsson, *Senior Member, IEEE, Fellow, OSA*

ω

t

$$H_{CD}(e^{j\omega T}) = e^{-jM(\omega T)^2} \longrightarrow h_n^{DS} = \sqrt{\frac{j}{4M\pi}} e^{-j\frac{n^2}{4M}}$$

Применение МО для компенсации искажений Свёрточные нейронные сети. Линейные слои

W1G.4.pdf

OFC 2017 © OSA 2017

Time-Domain Digital Back Propagation: Algorithm and Finite-Precision Implementation Aspects

Christoffer Fougstedt¹, Mikael Mazur², Lars Svensson¹, Henrik Eliasson², Magnus Karlsson²,
and Per Larsson-Edefors¹

¹Dept. of Computer Science and Engineering, ²Dept. of Microtechnology and Nanoscience,
Chalmers University of Technology, SE-412 96 Göteborg, Sweden
chrjou@chalmers.se

$$A(z + \Delta z, t) = (A(z, t) * h_{CDC}(\Delta z)) \cdot \exp((\alpha \Delta z)/2) \cdot \exp(-j \Delta z \gamma |A|^2),$$

5110

JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 34, NO. 22, NOVEMBER 15, 2016

Dispersion Compensation FIR Filter With Improved Robustness to Coefficient Quantization Errors

Alireza Sheikh, *Student Member, IEEE*, Christoffer Fougstedt, *Student Member, IEEE*,
Alexandre Graell i Amat, *Senior Member, IEEE*, Pontus Johannisson, *Member, IEEE*,
Per Larsson-Edefors, *Senior Member, IEEE*, and Magnus Karlsson, *Senior Member, IEEE, Fellow, OSA*

ω

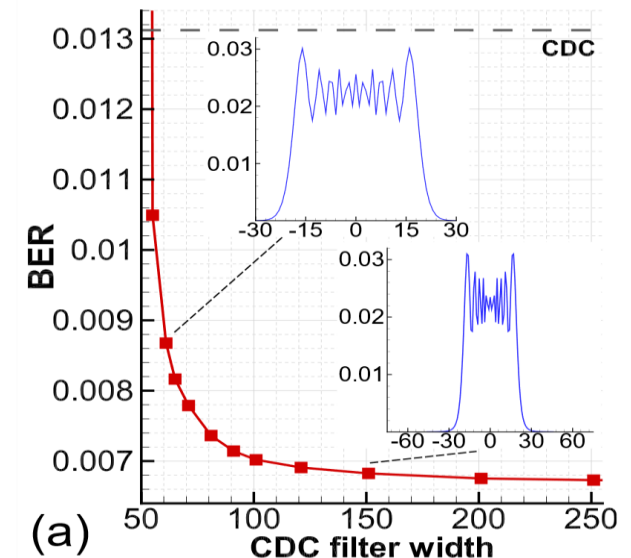
t

$$H_{CD}(e^{j\omega T}) = e^{-jM(\omega T)^2} \longrightarrow h_n^{DS} = \sqrt{\frac{j}{4M\pi}} e^{-j\frac{n^2}{4M}}$$

- Компенсация дисперсии во временной области.
- Свёрточные слои на линейном шаге:

$$y_i = \sum_{k=-(S-1)/2}^{(S-1)/2} \omega_k x_{i+k}$$

- Предварительная совместная оптимизация всех линейных фильтров.



Применение МО для компенсации искажений Свёрточные нейронные сети. Нелинейные слои

Связанные нелинейные уравнения Шредингера (CNLSE):

$$\frac{\partial A_c^{x|y}}{\partial z} = -d_c \frac{\partial A_c^{x|y}}{\partial t} - \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_c^{x|y}}{\partial t^2} + i \frac{8\gamma}{9} \left(|A_c^x|^2 + |A_c^y|^2 + 2 \sum_{s \neq c} (|A_s^x|^2 + |A_s^y|^2) \right) A_c^{x|y}$$

ECOC 2014, Cannes - France
We.3.3.5

Enhanced Split-Step Fourier Method for Digital Backpropagation

Marco Secondini⁽¹⁾, Domenico Marsella⁽¹⁾, Enrico Forestieri⁽¹⁾

⁽¹⁾Scuola Superiore Sant'Anna, TeCIP Institute, Pisa, Italy, marco.secondini@sssup.it

$$z_k = y_k e^{-j\gamma |y_k|^2 \Delta z_{\text{eff}}}$$



$$z_k = y_k e^{-j\gamma \Delta z_{\text{eff}} (c_0 |y_k|^2 + \sum_{i=1}^{N_c} c_i (|y_{k-i}|^2 + |y_{k+i}|^2))}$$

Применение МО для компенсации искажений

Свёрточные нейронные сети. Нелинейные слои

Связанные нелинейные уравнения Шредингера (CNLSE):

$$\frac{\partial A_c^{x|y}}{\partial z} = -d_c \frac{\partial A_c^{x|y}}{\partial t} - \frac{i\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_c^{x|y}}{\partial t^2} + i \frac{8\gamma}{9} \left(|A_c^x|^2 + |A_c^y|^2 + 2 \sum_{s \neq c} (|A_s^x|^2 + |A_s^y|^2) \right) A_c^{x|y}$$

ECOC 2014, Cannes - France
We.3.3.5

Enhanced Split-Step Fourier Method for Digital Backpropagation

Marco Secondini⁽¹⁾, Domenico Marsella⁽¹⁾, Enrico Forestieri⁽¹⁾

⁽¹⁾Scuola Superiore Sant'Anna, TeCIP Institute, Pisa, Italy, marco.secondini@sssup.it

$$z_k = y_k e^{-j\gamma |y_k|^2 \Delta z_{\text{eff}}}$$



$$z_k = y_k e^{-j\gamma \Delta z_{\text{eff}} (c_0 |y_k|^2 + \sum_{i=1}^{N_c} c_i (|y_{k-i}|^2 + |y_{k+i}|^2))}$$

- Нелинейная функция активации:

$$f(z_k^{x|y,c}) = e^{-i\Phi_k^{x|y,c}} z_k^{x|y,c}$$

$$\Phi_k^{x|y,c} = \sum_{s=0}^{N_{ch}} \sum_{i=-R_s}^{R_s} \alpha_{s,i}^c (|z_{k+i}^{x,s}|^2 + |z_{k+i}^{y,s}|^2)$$

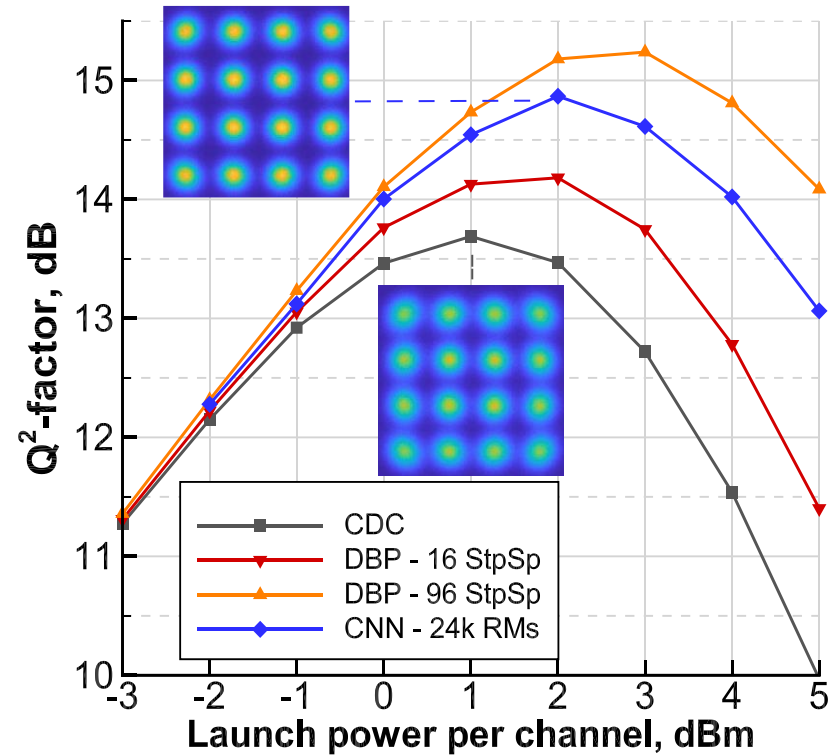
акции:

$$e^{-i\Phi_k^{x|y,c}} z_k^{x|y,c}$$

$$e^{-i \sum_{s=0}^{N_{ch}} \sum_{i=-R_s}^{R_s} \alpha_{s,i}^c (|z_{k+i}^{x,s}|^2 + |z_{k+i}^{y,s}|^2)}$$

Применение МО для компенсации искажений

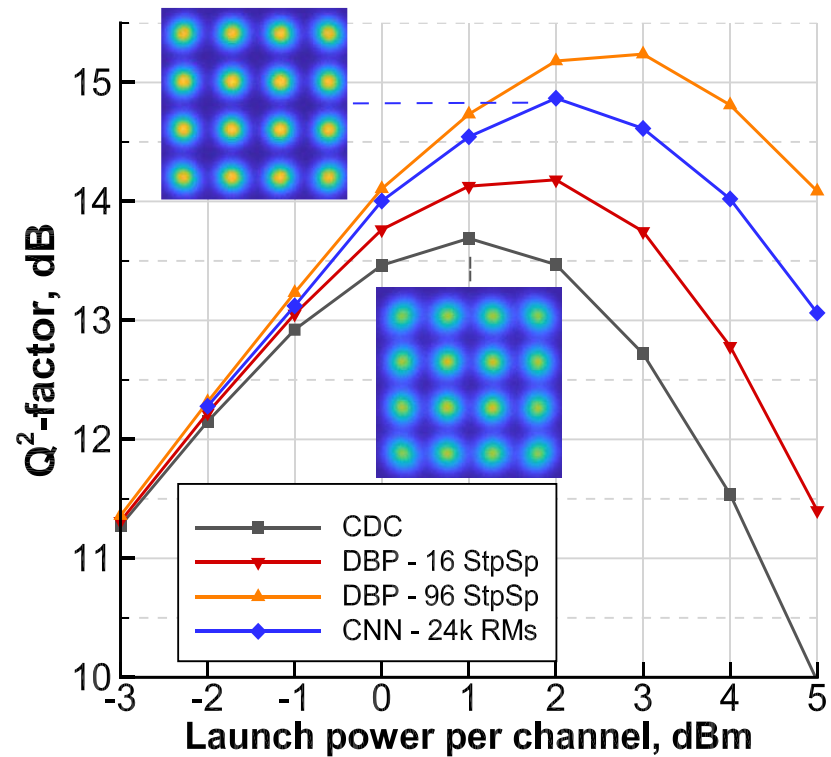
Свёрточные нейронные сети



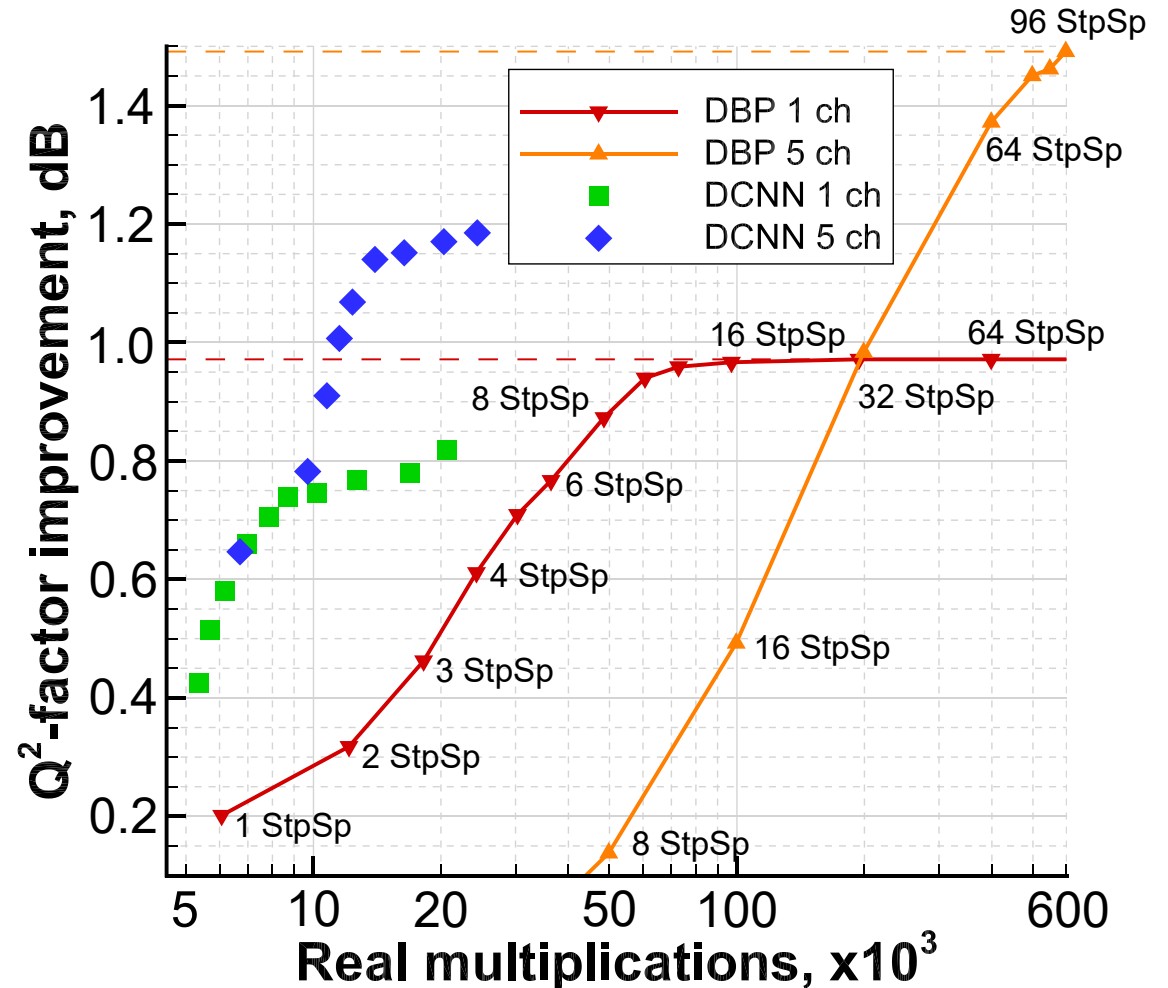
	Steps	CDC	SPM	XPM-1	XPM-2	XPM-3	XPM-4	Compl.		
	per	filter	filter	filter	filter	filter	filter	x1000		
	span	width	width	width	width	width	width			
DBP	16 StpSp	16	2	-	-	-	-	99.61		
	96 StpSp	96	2	-	-	-	-	597.66		
DCNN	24k RMs	1	1	251	31	40	43	37	21	24.23

Применение МО для компенсации искажений

Свёрточные нейронные сети

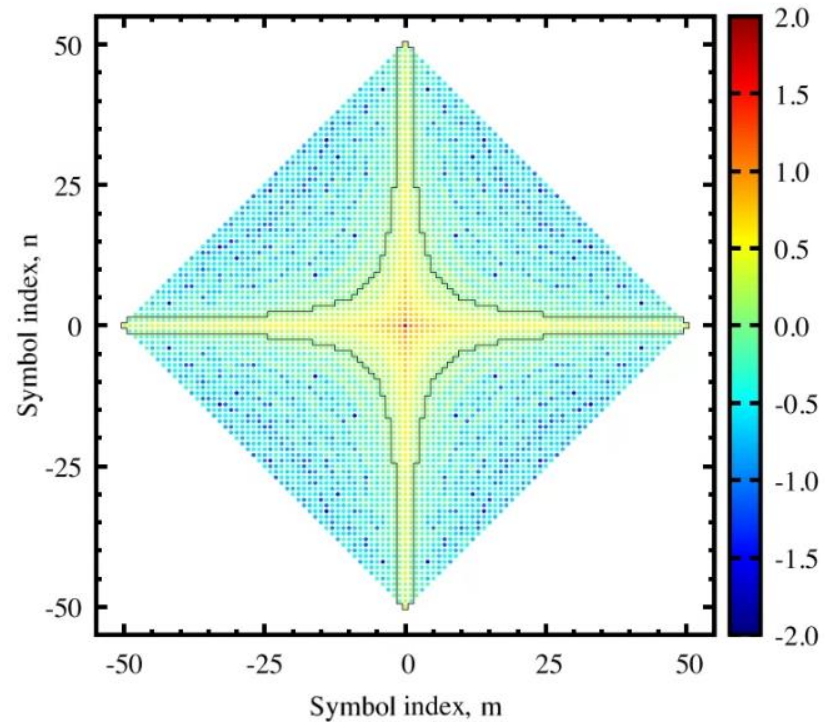


		Steps	CDC	SPM	XPM-1	XPM-2	XPM-3	XPM-4	Compl.	
		per	filter	filter	filter	filter	filter	filter	x1000	
		span	width	width	width	width	width	width		
DBP	16 StpSp	16	2	-	-	-	-	-	99.61	
	96 StpSp	96	2	-	-	-	-	-	597.66	
DCNN	24k RMs	1	1	251	31	40	43	37	21	24.23



Применение МО для компенсации искажений

Теория возмущений



Применение МО для компенсации искажений

Теория возмущений

2570

JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 29, NO. 17, SEPTEMBER 1, 2011

Multiplier-Free Intrachannel Nonlinearity Compensating Algorithm Operating at Symbol Rate

Zhenning Tao, *Senior Member, IEEE*, Liang Dou, Weizhen Yan, Lei Li, Takeshi Hoshida, *Member, IEEE*, and
Jens C. Rasmussen, *Member, IEEE*

Уравнения Манакова:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} u_x(t, z) + j \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} u_x(t, z) \\ = j \frac{8}{9} \gamma [|u_x(t, z)|^2 + |u_y(t, z)|^2] u_x(t, z) \\ \frac{\partial}{\partial z} u_y(t, z) + j \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} u_y(t, z) \\ = j \frac{8}{9} \gamma [|u_x(t, z)|^2 + |u_y(t, z)|^2] u_y(t, z) \end{aligned}$$

$$u(t, z) = u_0(t, z) + \Delta u(t, z)$$

Применение МО для компенсации искажений

Теория возмущений

2570

JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 29, NO. 17, SEPTEMBER 1, 2011

Multiplier-Free Intrachannel Nonlinearity Compensating Algorithm Operating at Symbol Rate

Zhenning Tao, *Senior Member, IEEE*, Liang Dou, Weizhen Yan, Lei Li, Takeshi Hoshida, *Member, IEEE*, and Jens C. Rasmussen, *Member, IEEE*

Уравнения Манакова:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} u_x(t, z) + j \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} u_x(t, z) \\ = j \frac{8}{9} \gamma [|u_x(t, z)|^2 + |u_y(t, z)|^2] u_x(t, z) \\ \frac{\partial}{\partial z} u_y(t, z) + j \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} u_y(t, z) \\ = j \frac{8}{9} \gamma [|u_x(t, z)|^2 + |u_y(t, z)|^2] u_y(t, z) \end{aligned}$$

$$u(t, z) = u_0(t, z) + \Delta u(t, z)$$

Теория возмущения:

$$\begin{aligned} \Delta u_x &= \sum_{m,n} P_0^{3/2} (A_{n,x} A_{m+n,x}^* A_{m,x} \\ &\quad + A_{n,y} A_{m+n,y}^* A_{m,x}) C_{m,n} \\ \Delta u_y &= \sum_{m,n} P_0^{3/2} (A_{n,y} A_{m+n,y}^* A_{m,y} \\ &\quad + A_{n,x} A_{m+n,x}^* A_{m,y}) C_{m,n} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{m,n} &= i \gamma P_0 \int_0^L dz e^{-\alpha z} \iiint \frac{d\omega}{2\pi} \frac{d\omega_1}{2\pi} \frac{d\omega_2}{2\pi} \\ &\quad \times \hat{f}_\omega^* \hat{f}_{\omega_1+\omega} \hat{f}_{\omega_2+\omega} \hat{f}_{\omega_1+\omega_2+\omega}^* e^{-i\beta_2 \omega_1 \omega_2 z - i\omega_1 m T - i\omega_2 n T} \end{aligned}$$

Применение МО для компенсации искажений

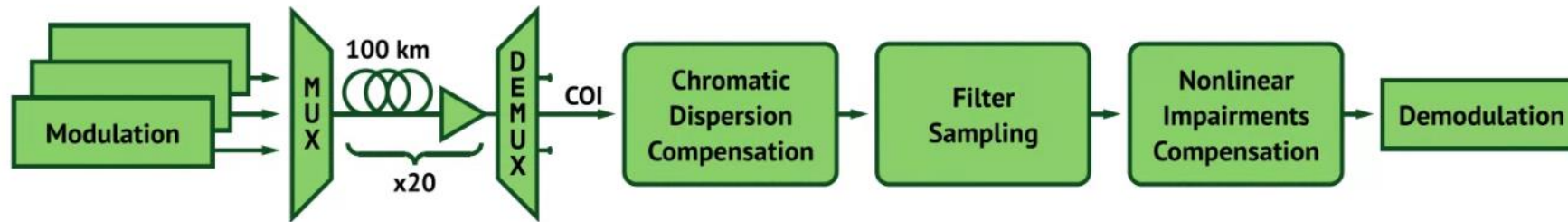
Теория возмущений

1250

JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 38, NO. 6, MARCH 15, 2020

Compensation of Nonlinear Impairments Using Inverse Perturbation Theory With Reduced Complexity

Alexey Redyuk, Evgeny Averyanov, Oleg Sidelnikov, Mikhail Fedoruk, and Sergei Turitsyn, Fellow, OSA



16QAM, 32 Gbaud, 200G, 11 каналов, 2000 км

$$b_x[k] = a_x[k] + \sum_{m,n} C_{mn} a_x[k+m] a_x[k+n] a_x^*[k+m+n] + \sum_{m,n} C_{mn} a_x[k+m] a_y[k+n] a_y^*[k+m+n], \quad (3)$$

$a_{x|y}$ - переданные символы, $b_{x|y}$ - принятые символы

Применение МО для компенсации искажений

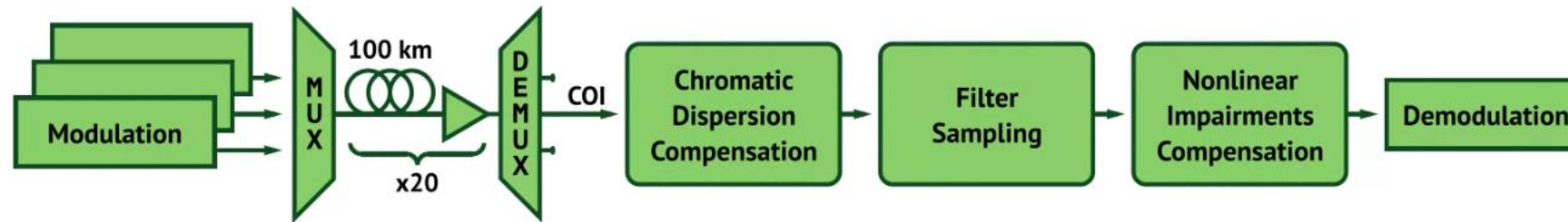
Теория возмущений

1250

JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 38, NO. 6, MARCH 15, 2020

Compensation of Nonlinear Impairments Using Inverse Perturbation Theory With Reduced Complexity

Alexey Redyuk, Evgeny Averyanov, Oleg Sidelnikov, Mikhail Fedoruk, and Sergei Turitsyn, Fellow, OSA



16QAM, 32 Gbaud, 200G, 11 каналов, 2000 км

$$b_x[k] = a_x[k] + \sum_{m,n} C_{mn} a_x[k+m] a_x[k+n] a_x^*[k+m+n] + \sum_{m,n} C_{mn} a_x[k+m] a_y[k+n] a_y^*[k+m+n], \quad (3)$$

$$a_x[k] = C b_x[k] + \sum_{m,n} \tilde{C}_{mn} b_x[k+m] b_x[k+n] b_x^*[k+m+n] + \sum_{m,n} \tilde{C}_{mn} b_x[k+m] b_y[k+n] b_y^*[k+m+n]. \quad (5)$$

$a_{x|y}$ - переданные символы, $b_{x|y}$ - принятые символы

Применение МО для компенсации искажений

Теория возмущений

Модель линейной регрессии:

$$a_x[k] = Cb_x[k] + \sum_{m,n} \tilde{C}_{mn} b_x[k+m] b_x[k+n] b_x^*[k+m+n] \\ + \sum_{m,n} \tilde{C}_{mn} b_x[k+m] b_y[k+n] b_y^*[k+m+n]. \quad (5)$$



$$\mathbf{X}\beta = y$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \vdots & & \vdots & & \\ b[k] & \dots & b[k+m]b[k+n]b^*[k+m+n] & \dots & \\ \vdots & & \vdots & & \end{bmatrix}$$

$$\beta = [C \dots \tilde{C}_{mn} \dots]^\top, \quad y = [\dots a[k] \dots]^\top.$$

Применение МО для компенсации искажений

Теория возмущений

Модель линейной регрессии:

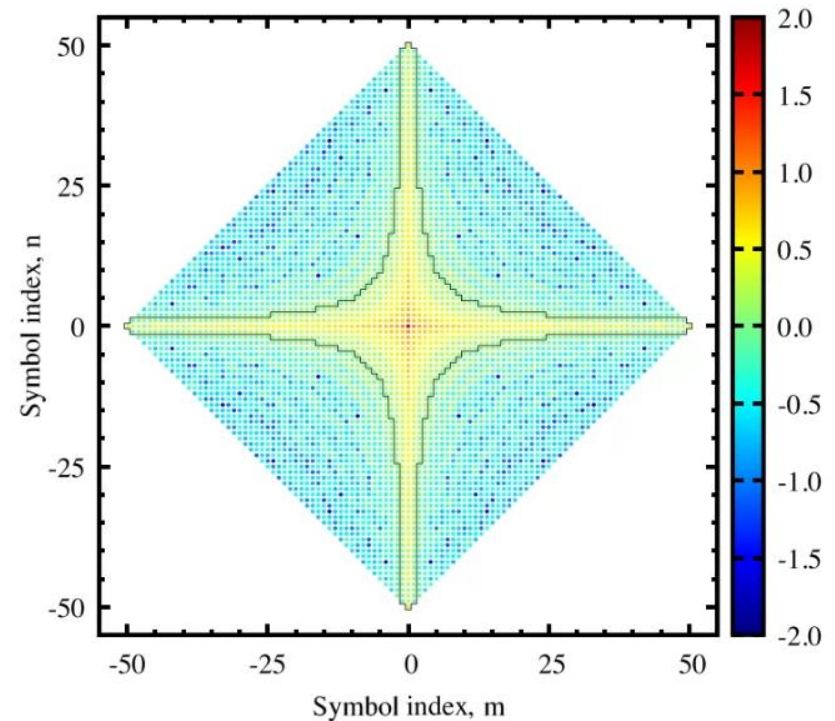
$$a_{\mathbf{x}}[k] = Cb_{\mathbf{x}}[k] + \sum_{m,n} \tilde{C}_{mn} b_{\mathbf{x}}[k+m] b_{\mathbf{x}}[k+n] b_{\mathbf{x}}^*[k+m+n] + \sum_{m,n} \tilde{C}_{mn} b_{\mathbf{x}}[k+m] b_{\mathbf{y}}[k+n] b_{\mathbf{y}}^*[k+m+n]. \quad (5)$$



$$\mathbf{X}\beta = y$$

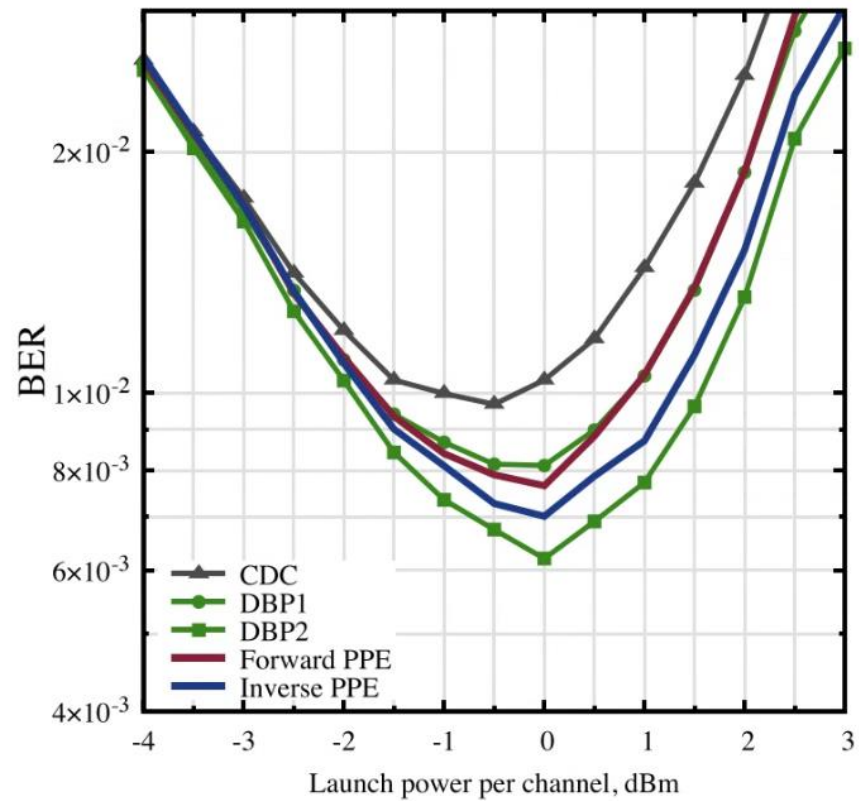
$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} \vdots & & \vdots \\ b[k] & \dots & b[k+m]b[k+n]b^*[k+m+n] & \dots \\ \vdots & & \vdots \end{bmatrix}$$

$$\beta = [C \dots \tilde{C}_{mn} \dots]^T, \quad y = [\dots a[k] \dots]^T.$$



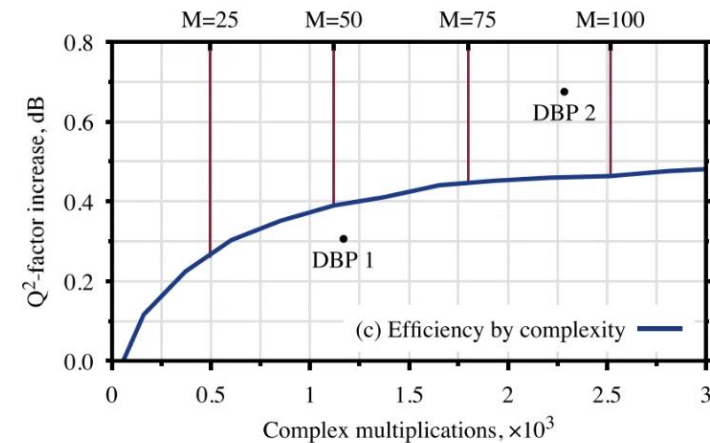
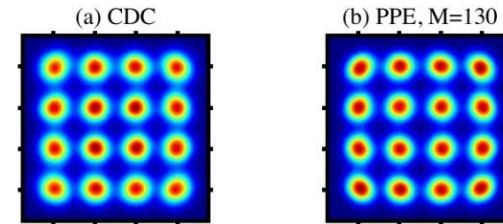
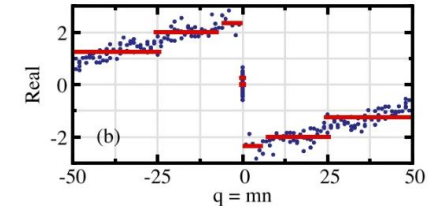
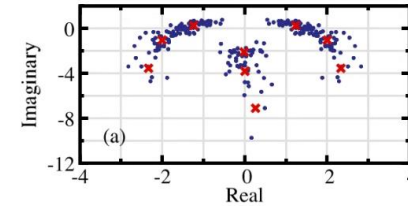
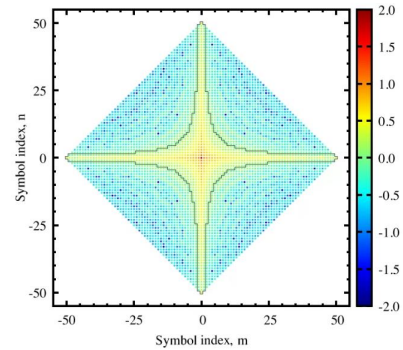
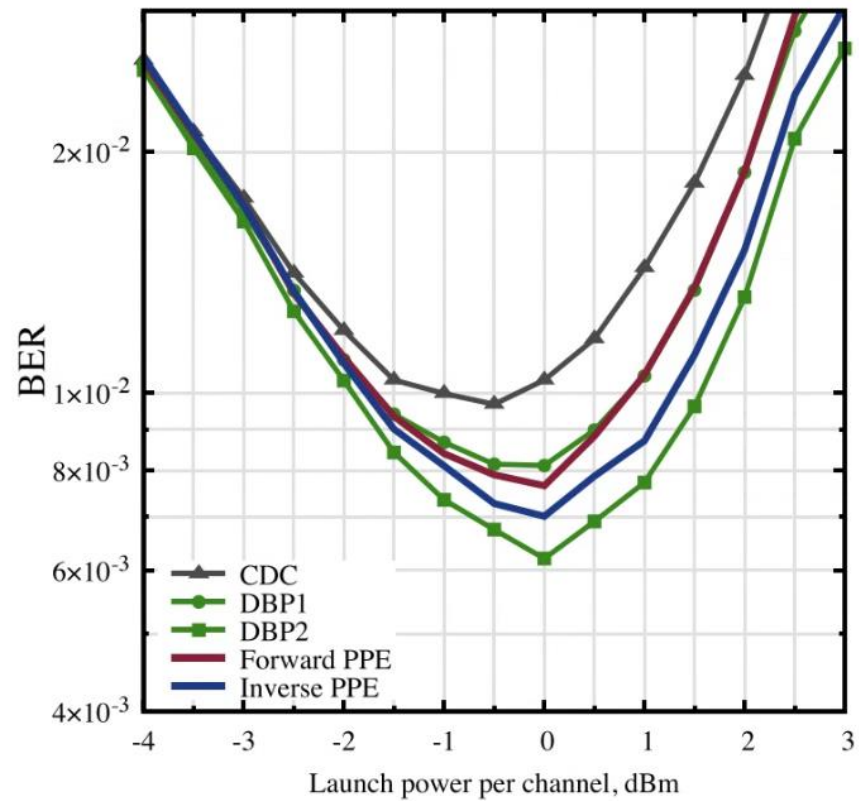
Применение МО для компенсации искажений

Теория возмущений

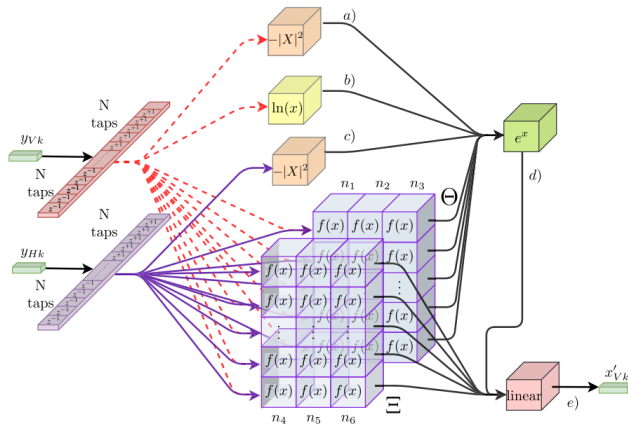


Применение МО для компенсации искажений

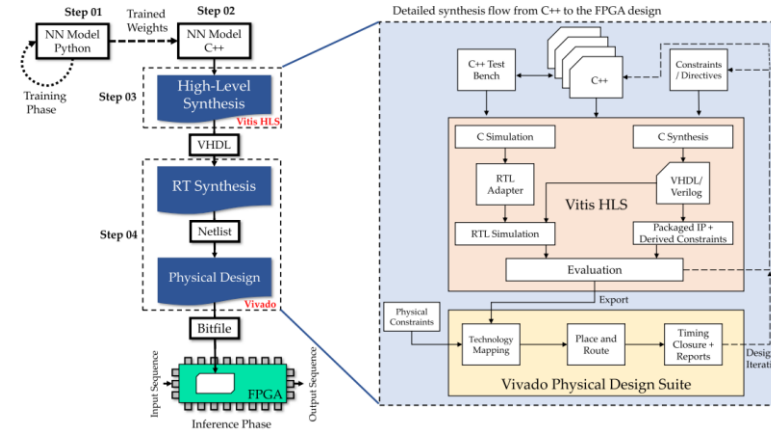
Теория возмущений



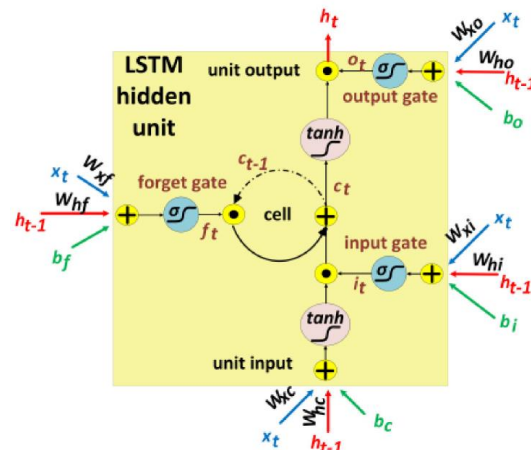
Применение МО для компенсации искажений



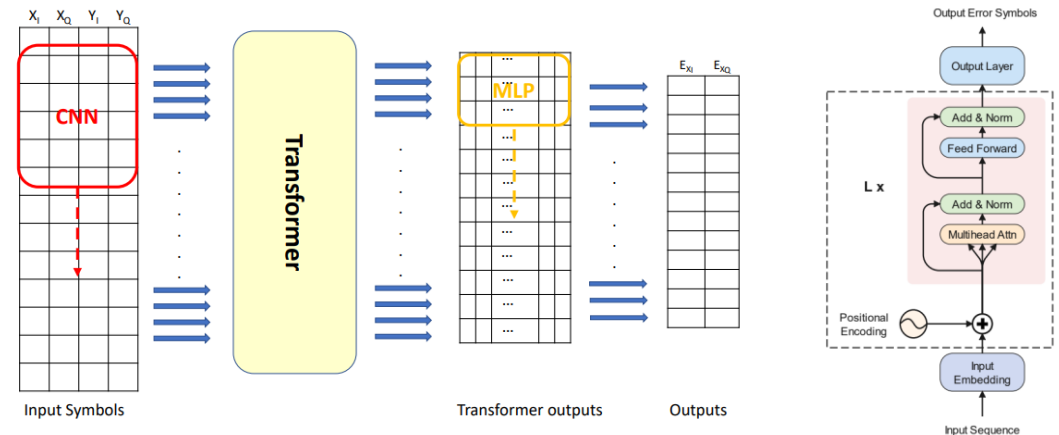
Freire, P. J., Neskornuik, V., Napoli, A., Spinnler, B., Costa, N., Khanna, G., ... & Turitsyn, S. K. (2020). Complex-valued neural network design for mitigation of signal distortions in optical links. *Journal of Lightwave Technology*, 39(6), 1696-1705.



Freire, P. J., Srivallapanondh, S., Anderson, M., Spinnler, B., Bex, T., Eriksson, T. A., ... & Prilepsy, J. E. (2023). Implementing Neural Network-Based Equalizers in a Coherent Optical Transmission System Using Field-Programmable Gate Arrays. *Journal of Lightwave Technology*.



Deligiannidis, S., Bogris, A., Mesaritakis, C., & Kopsinis, Y. (2020). Compensation of fiber nonlinearities in digital coherent systems leveraging long short-term memory neural networks. *Journal of Lightwave Technology*, 38(21), 5991-5999.



Hamgini, B. B., Najafi, H., Bakhshali, A., & Zhang, Z. (2023). Application of Transformers for Nonlinear Channel Compensation in Optical Systems. *arXiv preprint arXiv:2304.13119*.

Спасибо за внимание!