

# Методы компенсации нелинейных эффектов в многоканальных системах передачи данных на основе динамических нейронных сетей

О.С.Сидельников, А.А.Редюк, С.Сиглетос, М.П.Федорук

*Предложена схема компенсации нелинейных эффектов в многоканальных системах передачи данных, основанная на динамических нейронных сетях. Продемонстрировано повышение качества передачи оптических сигналов по сравнению с качеством передачи в схеме на основе нейронной сети, использующей символы только с одного канала.*

**Ключевые слова:** оптическое волокно, нелинейные эффекты, нейронные сети, математическое моделирование, спектральное уплотнение каналов.

## 1. Введение

Нелинейные эффекты являются одним из основных факторов, ограничивающих пропускную способность современных волоконно-оптических линий связи. Эксплуатация современных многоканальных систем связи с более плотным использованием полосы пропускания предполагает увеличение общей мощности сигнала в волокне, что приводит к растущему влиянию нелинейных эффектов передачи [1–3]. Работа оптических линий связи в таких нелинейных режимах сильно отличается от работы в обычном линейном режиме и требует новых подходов и методов для обработки принятых сигналов высокой мощности. На сегодняшний день наиболее эффективной схемой компенсации нелинейных искажений является метод обратного распространения сигнала, который моделирует распространение сигналов по оптическому волокну в обратную сторону с помощью метода фурье-расщепления по физическим процессам [4]. Однако данный метод, как правило, требует довольно высоких вычислительных затрат и может применяться только в статических системах передачи данных, поскольку для его использования необходимо заранее знать все параметры линии связи. Среди других способов компенсации нелинейных искажений сигнала можно выделить семейство методов, основанных на использовании функционального ряда Вольтера [5], цифровые методы на основе элементов теории возмущений [6, 7], нелинейный фильтр Шредингера и алгоритм приема в целом с поэлементным принятием решения [8], а также оптические методы с применением фазового сопряжения сигнала [9]. В последние пять лет в области волоконно-оптических линий связи

стали особенно активно применяться методы машинного обучения [10–15]. Данные методы предлагают мощные статистические инструменты для разработки адаптивных эквалайзеров, способных компенсировать нелинейные эффекты передачи при невысокой вычислительной сложности. Такие нелинейные эквалайзеры могут быть основаны на методе опорных векторов [10], методе  $k$ -ближайших соседей [11], статических [12, 13] и динамических нейронных сетях [14, 15]. Кроме того, за счет возможности периодического переобучения схемы обработки принятых сигналов на основе методов машинного обучения могут применяться в динамически изменяющихся линиях связи.

В настоящей работе схема компенсации нелинейных искажений на основе динамических нейронных сетей (НС), предложенная в работе [15], расширяется на случай систем связи со спектральным уплотнением каналов (WDM). Разработанная схема, использующая символы с нескольких частотных каналов на входном слое нейронной сети, сравнивается с линейным компенсатором и с предыдущей версией схемы, использующей символы только с одного канала.

## 2. Математическое моделирование

В работе исследуется система передачи данных, схематически изображенная на рис.1. Линия связи состоит из передатчика, 20 пролетов стандартного одномодового волокна по 100 км каждый, эрбиевых оптических усилителей после каждого пролета и приемника. На передатчике генерируются 16-QAM-сигналы с символьной скоростью  $R_s = 32$  Гбод, что соответствует битовой скорости передачи 128 Гбит/с в одной поляризации одного канала. Для придания формы импульсам используется фильтр с характеристикой типа приподнятый косинус с коэффициентом сглаживания 0.01. В работе исследуется система передачи данных с 3 частотными каналами с межканальным расстоянием 32 ГГц, соответствующим символьной скорости. В качестве центральной длины волны излучаемой полосы сигнала используется  $\lambda = 1550$  нм. Шум, вызванный EDFA-усилителем,  $NF = 4.5$  дБ, добавляется к оптическому сигналу после каждого пролета.

О.С.Сидельников, А.А.Редюк, М.П.Федорук. Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; Институт вычислительных технологий СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 6; e-mail: o.s.sidelnikov@gmail.com, alexey.redyuk@gmail.com, mifester@gmail.com  
S.Sygetos. Aston University, England, Birmingham, B4 7ET; e-mail: s.sygetos@aston.ac.uk

Поступила в редакцию 11 октября 2019 г.

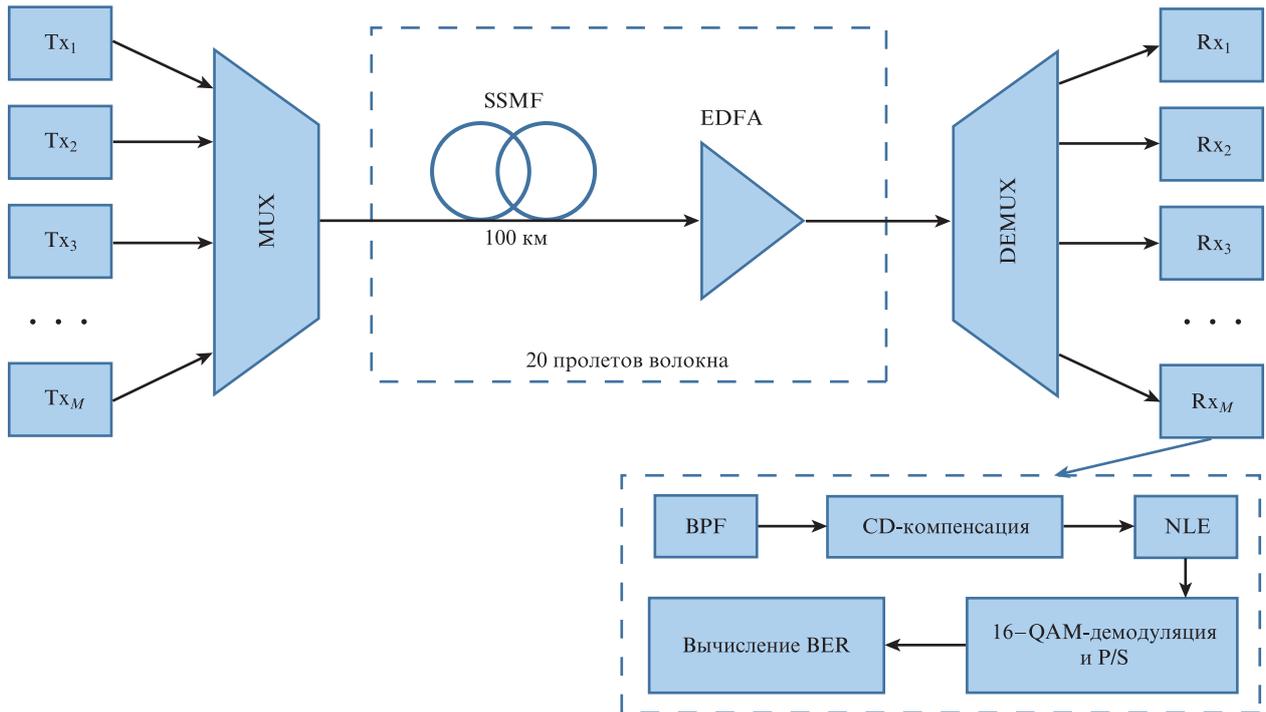


Рис.1. Схема исследуемой линии связи: Tx – передатчик для одного канала; MUX – WDM-мультиплексор; EDFA – эрбиевый усилитель; DEMUX – WDM-демультиплексор; Rx – приемник для одного канала; BPF – полосовая фильтрация; NLE – компенсация нелинейных эффектов.

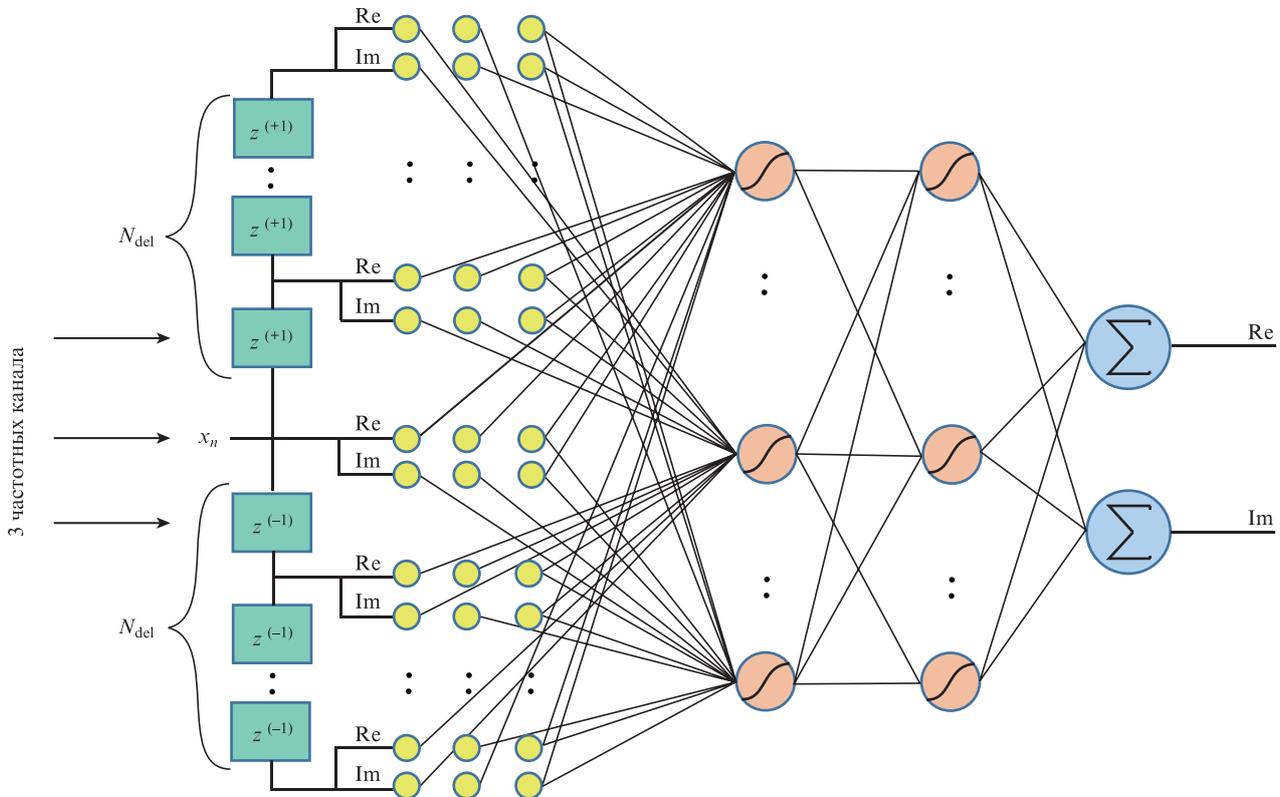


Рис.2. Архитектура динамической нейронной сети.

Распространение сигналов по оптическому волокну описывается нелинейным уравнением Шредингера [1]:

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

где  $A(z, t)$  – медленно меняющаяся огибающая оптического сигнала;  $\alpha = 0.2$  дБ/км – потери волокна;  $\beta_2 = -25$  пс<sup>2</sup>/км – хроматическая дисперсия;  $\gamma = 1.4$  Вт<sup>-1</sup>·км<sup>-1</sup> – нелинейный параметр волокна. Данное уравнение решалось численно с помощью симметричного метода Фурье-расше-

пления по физическим процессам при частоте дискретизации 16 отсчетов на символ.

После передачи по каналу оптические сигналы поступали в приемник, в котором после разделения частотных каналов выполнялась идеальная компенсация хроматической дисперсии. Для компенсации нелинейных искажений использовались линейная схема компенсации и схемы, основанные на динамических нейронных сетях, которые используют все частотные каналы или только центральный. Целевой функцией рассмотренных методов является коэффициент битовых ошибок (BER).

### 3. Схема компенсации нелинейных эффектов на основе динамических нейронных сетей

Архитектура предложенной нейронной сети представлена на рис.2. Здесь, в отличие от схемы из работы [15], на вход нейронной сети подаются символы со всех частотных каналов. Для учета эффекта памяти канала в схеме нейронной сети используются блоки задержки, что позволяет на входе НС использовать предыдущие и последующие символы. Такая нейронная сеть называется динамической.

В работе используются нейронные сети, работающие с действительными числами, поэтому поступающие на вход комплексные символы разделяются на действительные  $Re$  и мнимые  $Im$  части. Число нейронов на входном слое исследуемой НС равно  $3 \times 2 \times (2 \times N_{del} + 1)$ , где  $N_{del}$  – число используемых соседних символов в каждом из направлений. Множитель 3 соответствует числу каналов, подаваемых на вход нейронной сети. Сеть также состоит из двух скрытых слоев и выходного слоя с двумя нейронами, соответствующими действительной и мнимой части обрабатываемого символа. В качестве функции активации на скрытых слоях использовался гиперболический тангенс, в то время как на выходном слое использовалась линейная передаточная функция. Для нахождения весов сети использовался алгоритм оптимизации Адам (Adam – Adaptive Moment Estimation) на тренировочном наборе переданных и принятых символов. Обученная нейронная сеть тестировалась на тестовом наборе для обработки принятого символа. Для вычисления коэффициента битовых ошибок выполнялось 10 запусков по  $2^{18}$  символов в каждом, из которых  $2^{16}$  символов использовались для обучения, а остальные – для вычисления BER.

### 4. Результаты применения схемы компенсации нелинейных эффектов на основе динамических нейронных сетей

Первой рассматривалась НС, в которой на вход подаются символы только с одного канала, и для нее исследовалось влияние числа блоков задержки на эффективность компенсации нелинейных искажений для различных архитектур нейронных сетей. На рис.3 представлена зависимость коэффициента битовых ошибок от числа соседних символов в каждом направлении, подаваемых на вход НС, для сетей с 64 и 192 нейронами на каждом из скрытых слоев.

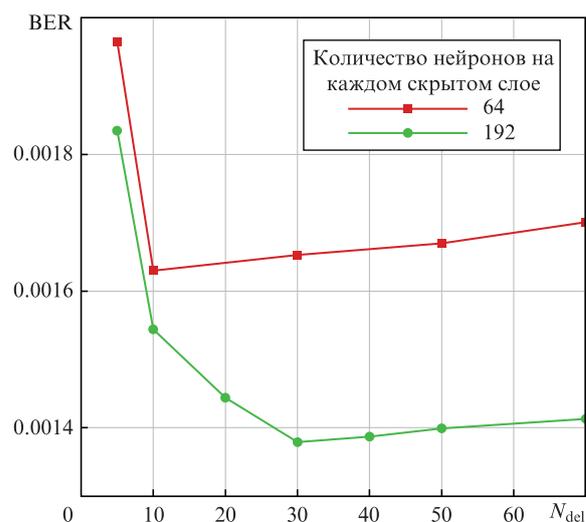


Рис.3. Зависимость BER от числа используемых соседних символов.

Видно, что при увеличении числа нейронов на скрытых слоях увеличивается и оптимальное число используемых соседних символов. При дальнейшем росте числа соседних символов BER начинает постепенно ухудшаться.

Для оценки эффективности предложенного многоканального метода компенсации нелинейных эффектов он сравнивался с линейным алгоритмом компенсации и со схемой на основе нейронной сети, использующей информацию только с центрального канала. На рис.4 представлена зависимость коэффициента битовых ошибок от мощности начального сигнала для различных схем компенсации нелинейных искажений: линейной схемы компенсации, основанной на алгоритме LMS (Least Mean Square), которая восстанавливает только фазу принятого сигнала, нейронной сети, в которой для предсказания символа на входе используются символы только с центрального канала, имеющей два скрытых слоя по 64 нейрона на каждом, а также динамической нейронной сети, которая использует информацию со всех частотных каналов и также имеет по 64 нейрона на каждом из скрытых слоев. Рассматривались нейронные сети с параметром  $N_{del} = 10$ .

Из рис.4 видно, что схемы, основанные на динамических нейронных сетях, превосходят по коэффициенту битовых ошибок линейный компенсатор. Однако использование информации со всех трех каналов дает лишь небольшое улучшение BER по сравнению с одноканальной НС. Это связано с тем, что нейронная сеть с 64 нейронами на скрытых слоях может эффективно обработать только по 10 соседних символов в каждом направлении (см. рис.3). «Одноканальная» нейронная сеть уже использует это оптимальное число соседних импульсов, и поэтому предложенная многоканальная схема, в которой на вход подаются дополнительные 42 символа с соседних каналов (по 21 символу с каждого канала) не позволяет их эффективно обработать и использовать для компенсации межканальных нелинейных эффектов, что дало бы возможность дополнительно уменьшить коэффициент битовых ошибок. Таким образом, использование информации со всех частотных каналов не приводит к улучшению качества передачи данных для таких архитектур нейронных сетей.

Следующими исследовались нейронные сети со 192 нейронами на каждом скрытом слое и с числом используемых соседних символов в каждом направлении  $N_{del} = 30$ .

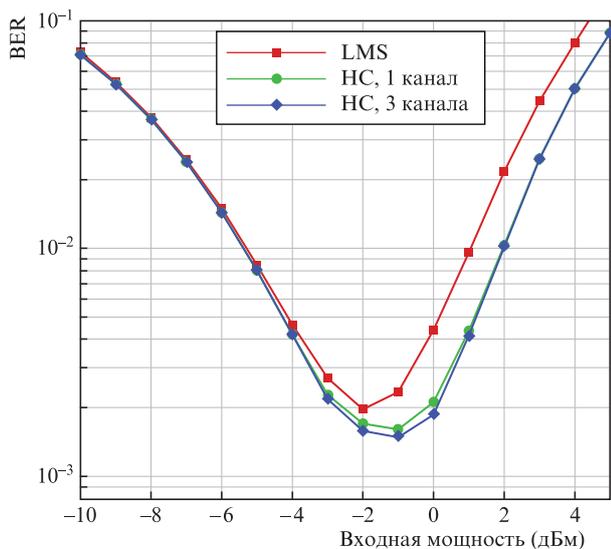


Рис.4. Зависимость BER от мощности начального сигнала для различных схем компенсации нелинейных искажений для НС с 64 нейронами на скрытых слоях.

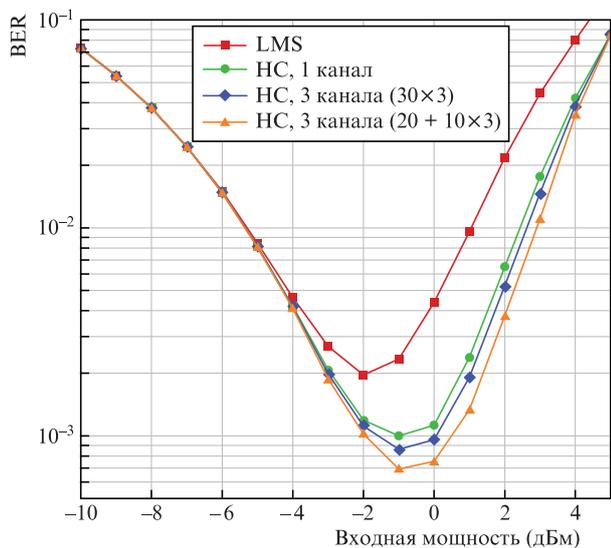


Рис.5. Зависимость BER от мощности начального сигнала для различных схем компенсации нелинейных искажений для НС со 192 нейронами на скрытых слоях.

На рис.5 представлена зависимость BER от начальной мощности сигнала для линейного компенсатора и схем, основанных на динамических нейронных сетях, которые используют все частотные каналы или только центральный.

Здесь использование данных со всех каналов все так же дает лишь небольшое улучшение коэффициента битовых ошибок по сравнению с одноканальной НС. Тем не менее в этом случае выигрыш в BER немного больше, чем в случае НС с 64 нейронами на каждом скрытом слое.

Однако, если рассмотреть нейронную сеть, которая использует по 20 соседних символов в каждом направлении с центрального канала и по 10 соседних символов с первого и третьего каналов (НС, 3 канала (20 + 10 × 3)), то эффективность компенсации нелинейности повысится и коэффициент битовых ошибок уменьшится на 65% по сравнению с линейной схемой компенсации и на 31% по сравнению с одноканальной НС. Это можно объяснить тем, что число подаваемых символов на вход нейронной сети близко к оптимальному, и поэтому рассматриваемая схема может эффективно использовать символы с соседних частотных каналов для компенсации фазовой кросс-модуляции и эффектов четырехволнового смешения, что положительно сказывается на качестве восстановления сигнала. Ожидается, что дальнейшее увеличение числа нейронов на скрытых слоях позволит получить еще больший выигрыш при использовании символов со всех частотных каналов по сравнению с одноканальной нейронной сетью.

### 5. Заключение

Предложена схема обработки оптических сигналов в приемнике системы связи, основанная на динамических нейронных сетях и использующая для компенсации нелинейных искажений символы с нескольких частотных каналов. Для данной схемы исследовано влияние архитектуры нейронной сети на эффективность обработки сигналов. Проведено сравнение качества передачи данных при использовании различных методов компенсации нелинейности и показано превосходство предложенной схемы над одноканальной нейронной сетью при сохранении архитектуры скрытых слоев.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект №17-72-30006). Работа О.С.Сидельникова выполнена в рамках реализации государственного задания Министерства образования и науки РФ (проект № 1.6366.2017/8.9).

1. Agrawal G.P. *Nonlinear Fiber Optics* (Boston: Academic Press, 2013).
2. Temprana E. et al. *Science*, **348**, 1445 (2015).
3. Жителев А.Е. и др. *Квантовая электроника*, **47**, 1135 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 1135 (2017)].
4. Ip E. *J. Lightwave Technol.*, **28**, 6 (2010).
5. Liu L. et al. *J. Lightwave Technol.*, **30**, 310 (2012).
6. Sorokina M. et al. *Opt. Express*, **24**, 30433 (2016).
7. Редюк А.А. и др. *Прикл. фотоника*, **5**, 265 (2018).
8. Бурдин В.А. и др. *Квантовая электроника*, **47**, 1144 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 1144 (2017)].
9. Ellis A.D. et al. *Opt. Express*, **23**, 20381 (2015).
10. Li M. et al. *IEEE Photonics J.*, **5**, 6 (2013).
11. Wang D. et al. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **28**, 19 (2016).
12. Jarajreh M. et al. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **27**, 4 (2015).
13. Giacoumidis E. et al. *Opt. Lett.*, **40**, 21 (2015).
14. Сидельников О.С. и др. *Квантовая электроника*, **47**, 1147 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 1147 (2017)].
15. Sidelnikov O. et al. *Opt. Express*, **26**, 25 (2018).