

## **Тема работы.**

Исследование компенсации нелинейных искажений в системе когерентной оптической связи DP-64QAM с помощью модифицированной теории возмущений и применения методов машинного обучения.

## **Состав коллектива:**

Козулин Игорь Анатольевич, НГУ, лаборатория нелинейной фотоники НГУ, научный сотрудник, к.ф.-м.н., экспериментатор, программист.

Сидельников Олег Сергеевич, лаборатория нелинейной фотоники НГУ, младший научный сотрудник, к.ф.-м.н., программист.

Редюк Алексей Александрович, лаборатория нелинейной фотоники НГУ, младший научный сотрудник, к.ф.-м.н., ученый секретарь ИВТ СО РАН.

Турицын Сергей Константинович, лаборатория нелинейной фотоники НГУ, профессор, к.ф.-м.н., руководитель проекта.

Федорук Михаил Петрович, чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., ректор НГУ.

## **Информация о гранте:**

РНФ №17-72-30006 “Нелинейные технологии для оптических коммуникаций и лазерных приложений”, (2017-2020.), руководитель Турицын Сергей Константинович.

## **Научное содержание работы:**

### **1. Постановка задачи**

Нелинейные искажения в когерентных оптических линиях связи являются одним из ключевых факторов, ограничивающих дальнейшее совершенствование современных волоконно-оптических систем связи. Увеличить спектральную эффективность и канальную скорость когерентных систем связи с поляризационным мультиплексированием позволяет использование в них многоуровневых (M-уровневых) квадратурных форматов модуляции (QAM). Многоуровневые форматы модуляции являются перспективными кандидатами для реализации будущей целевой скорости до 1 Тбит/с на канал.

В рамках проекта проведены исследования по компенсации нелинейных искажений в системе когерентной оптической связи DP-64QAM с помощью модифицированной теории возмущений и применения методов машинного обучения. Разработанная модель способна уменьшить как внутриканальную, так и межканальную нелинейность с незначительным увеличением вычислительной сложности.

### **2. Современное состояние проблемы, с ссылками на источники**

Волоконно-оптические линии связи являются эффективными для передачи больших объёмов данных на большие расстояния с минимальными задержками. Одним из главных факторов, ограничивающих пропускную способность оптической линии связи являются нелинейные эффекты, которые возрастают с ростом мощности сигнала [1]. Нынешний рекорд скорости для SSMF в 101.7 Тбит/с [2] достигнут с использованием когерентного детектирования, автономной обработки и формата модуляции 128-QAM. При передаче сигнала на большие расстояния, данные со скоростью 400 Гбит/с на канал могут быть переданы более чем на 12000 км с разнесением каналов 100 ГГц [3]. В настоящее время достаточно много работ посвящено использованию многомодовых волокон в линиях связи [4]. Одним из перспективных направлений исследований является изучение подавлений нелинейных эффектов и передачи больших объёмов информации с помощью методов машинного обучения, в том числе с применением методов классификации [5], сверхточных нейронных сетей, рекуррентных нейронных сетей [6-7].

- [1] Agrawal, G.P. Fiber-Optic Communication System, 3rd ed.; Wiley-Interscience: New York, USA, 2002; pp. 64–65, ISBN 0471215716.
- [2] Qian D. et al. 101.7-Tb/s (370× 294-Gb/s) PDM-128QAM-OFDM transmission over 3× 55-km SSMF using pilot-based phase noise mitigation //National Fiber Optic Engineers Conference. – Optical Society of America, 2011. – С. PDPB5.
- [3] Zhou X. et al. 12,000 km transmission of 100GHz spaced, 8 495-Gb/s PDM time-domain hybrid QPSK-8QAM signals //2013 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC). – IEEE, 2013. – С. 1-3.
- [4] Luo M. et al. Transmission of 200 Tb/s (375× 3× 178.125 Gb/s) PDM-DFTS-OFDM-32QAM super channel over 1 km FMM //Frontiers of Optoelectronics. – 2015. – Т. 8. – №. 4. – С. 394-401.
- [5] Wang, D., Zhang, M., Fu, M., Cai, Z., Li, Z., Han, H., ... & Luo, B. (2016). Nonlinearity mitigation using a machine learning detector based on k-Nearest neighbors. IEEE Photonics Technology Letters, 28(19), 2102-2105.
- [6] Sidelnikov O. S., Redyuk A. A., Sygletos S. Dynamic neural network-based methods for compensation of nonlinear effects in multimode communication lines //Quantum Electronics. – 2017. – Т. 47. – №. 12. – С. 1147.
- [7] Chuang, C. Y., Liu, L. C., Wei, C. C., Liu, J. J., Henrickson, L., Huang, W. J., ... & Chen, J. (2018, March). Convolutional Neural Network based Nonlinear Classifier for 112-Gbps High-Speed Optical Link. In Optical Fiber Communication Conference (pp. W2A-43). Optical Society of America.

### 3. Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы.

Поскольку нелинейное искажение сигнала в волоконно-оптических системах передачи обычно слабое, то можно линеаризовать уравнение Манакова. Основное предположение теории возмущений состоит в том, что приближенное решение можно записать в виде суммы линейного решения и небольшого возмущения. Взаимодействие сигнал-шум игнорируется, и шум добавляется на приемнике. Согласно теории возмущений принятые символы  $b_k$  во временном интервале  $k$  могут быть представлены в виде суммы переданных символов  $a_k$  и возмущения, которое может быть описано через матрицы  $C_{mn}$  и  $X_{mnr}$  для случая внутриканальной передачи данных (PPE, 1ch) и межканальных взаимодействий (PPE, 3ch), соответственно. Коэффициенты  $m, n$  для матрицы  $C_{mn}$  удовлетворяют условию  $abs(m*n) < R$ , где  $R$  – радиус матрицы, оптимальное значение которого определялось экспериментальным способом. Для матрицы межканального взаимодействия  $X_{mnr}$  индекс  $r$  отвечает за номер исследуемого канала. В данной работе рассматривалось трехканальное распространение сигнала, в этом случае  $r = -1, 0, 1$ .

Основным препятствием для использования данной теории на стороне приемника является необходимость заранее знать амплитуды передаваемых сигналов. Предложена модифицированная теория возмущений, в рамках которой полученные символы на приемнике  $b_k$  использовались в качестве аппроксимации для переданных символов  $a_k$ . Определение коэффициентов возмущений  $C_{mn}$  осуществлялось с помощью методов машинного обучения на заранее известном тестовом наборе отправленных символов. Оптимизация функционала при поиске неизвестных коэффициентов  $C_{mn}$  осуществлялась в комплексной арифметике с помощью методов машинного обучения: метода лассо и метода нормального уравнения с использованием регуляризации.

На основании аналитического представления матрицы  $C_{mn}$  можно показать, что существуют три симметрии:  $C_{mn} = C_{nm} = C_{-m-n} = C^*_{-m, n}$ . Применение первых двух симметрий позволило уменьшить общее число коэффициентов матрицы  $C_{mn}$  в четыре раза и добиться хорошей производительности модели, тогда как применение третьей симметрии приводит к дополнительному уменьшению коэффициентов матрицы  $C_{mn}$  в два раза, но приводит к небольшому снижению уровня предсказания переданных сигналов.

Определение коэффициентов  $X_{mnr}$  межканального взаимодействия осуществлялось совместно с определением коэффициентов матрицы  $C_{mn}$ . Согласно модели Frey F. et al. (2017, ECOC), существует только одна симметрия для каждой матрицы возмущений  $X_{mnr} = X_{-mnr}$ . В

дополнение к этому, нами добавлена симметрия  $X_{mn} = X_{m-n}$  предполагая, что влияние левого и правого равноудаленных соседних спектральных каналов вносят одинаковое возмущение для выделенного канала. Определена оптимальная форма матрицы  $X_{mn}$ , в частности была рассмотрена форма матрицы  $X_{mn}$  в виде ромба с условием на индексы  $n > \text{abs}(m)$  и  $\text{abs}(m \cdot n) < R$  и в виде линии с условием на индексы  $m=0$  и  $n \leq R$ . Установлено, что учет межканального взаимодействия в модели (PPE, 3ch) приводит к наибольшему выигрышу по Q2 фактору, если матрицы  $X_{mn}$  представлена в виде линии. В работе экспериментально определен оптимальный размер  $R$  матриц  $C_{mn}$  и  $X_{mn}$  увеличение которого не приводило к улучшению выигрыша по Q2 фактору. Определение коэффициентов  $X_{mn}$  было осуществлено по модели Frey F. et al. (2017, ECOC) и по модели Dar R. et al. (2014, Journal of Lightwave Technology). Установлено, что расчеты по модели Dar R. et al. дают больший выигрыш по Q2 фактору.

Определение коэффициентов матриц  $C_{mn}$  и  $X_{mn}$  позволило вычислить значения переданных символов в системе когерентной оптической связи DP-64QAM, Для улучшения классификации переданных символов был использован метод кластеризации K-means, это позволило найти оптимальные границы символов, расположенных на QAM диаграмме, после чего рассчитывались значения битовой ошибки BER, проводилось определение значения Q2 фактора.

Выполнено сравнение предложенной модели с моделью обратного распространения сигнала (DBP) в случае внутриканального и межканального взаимодействия. Для метода обратного распространения выявлено, что в случае внутриканальной передачи данных максимальный выигрыш соответствует 6 шагам на пролет (DBP, 6st/sp), для межканального взаимодействия 30 шагам на пролет (DBP, 30st/sp).

Проведено сравнение предложенного метода с методом обратного распространения сигнала (DBP). В случае межканального взаимодействия предложенный метод (PPE, 3ch) обеспечивает выигрыш по Q2 фактору больше, чем для расчетов по методу обратного распространения сигнала (DBP, 2st/sp), тогда как выигрыш по Q2 фактору при использовании расчетов для компенсации внутриканальной нелинейности (PPE, 1ch) ниже, чем уровень (DBP, 2st/sp) для всех мощностей. Для оптимальной мощности переданного сигнала 1 дБм показано улучшение Q2-фактора предложенной модели (PPE, 3ch) на 0,83 дБ, 0,51 дБ и 0,1 дБ соответственно при сравнении с линейным эквалайзером (CDC), методом обратного распространения сигнала (DBP, 1st/sp) и моделью расчета внутриканальной нелинейности (PPE, 1ch).

#### 4. Полученные результаты.

В рамках проекта проведены исследования компенсации нелинейных искажений в системе когерентной оптической связи WDM DP-64QAM 3x400 Гбит/с длиной 1200 км с помощью модифицированной теории возмущений и применения методов машинного обучения. В рамках модифицированной теории возмущений, полученные символы на приемнике использовались в качестве аппроксимации для переданных символов. Разработанная модель способна уменьшить как внутриканальную (PPE, 1ch), так и межканальную нелинейность для трех каналов (PPE, 3ch) с незначительным увеличением вычислительной сложности. При решении поставленной задачи использованы методы машинного обучения, такие как линейная регрессия, с методами регуляризации, для совместной идентификации коэффициентов возмущения, которые отвечают за внутри- и межканальные взаимодействия. Для повышения качества классификации выходного сигнала DP-64QAM применен алгоритм кластеризации K-means вместо стандартного декодирования с жестким решением. Проведено сравнение предложенного метода (PPE, 3ch) с линейным фазовым эквалайзером (CDC) и методом обратного распространения сигнала (DBP) с различным числом шагов на пролет и двумя отсчетами на символ.

Для оптимальной мощности переданного сигнала 1 дБм показано улучшение Q2-фактора модели (PPE, 3ch) на 0,83 дБ, 0,51 дБ соответственно при сравнении с линейным эквалайзером

(CDC), методом обратного распространения сигнала (DBP, 1st/sp). Учет межканальных возмущений привело к улучшению Q2 фактора на 0,1 дБ, увеличению сложности реализации на 30% по сравнению с одноканальной моделью (PPE, 1ch) и позволило превзойти результаты, полученные методом обратного распространения сигнала (DBP, 2st/sp).

### 5. Иллюстрации, визуализация результатов.

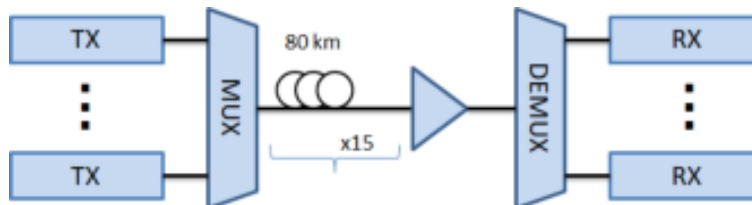


Рис.1. Схема исследуемой линии.

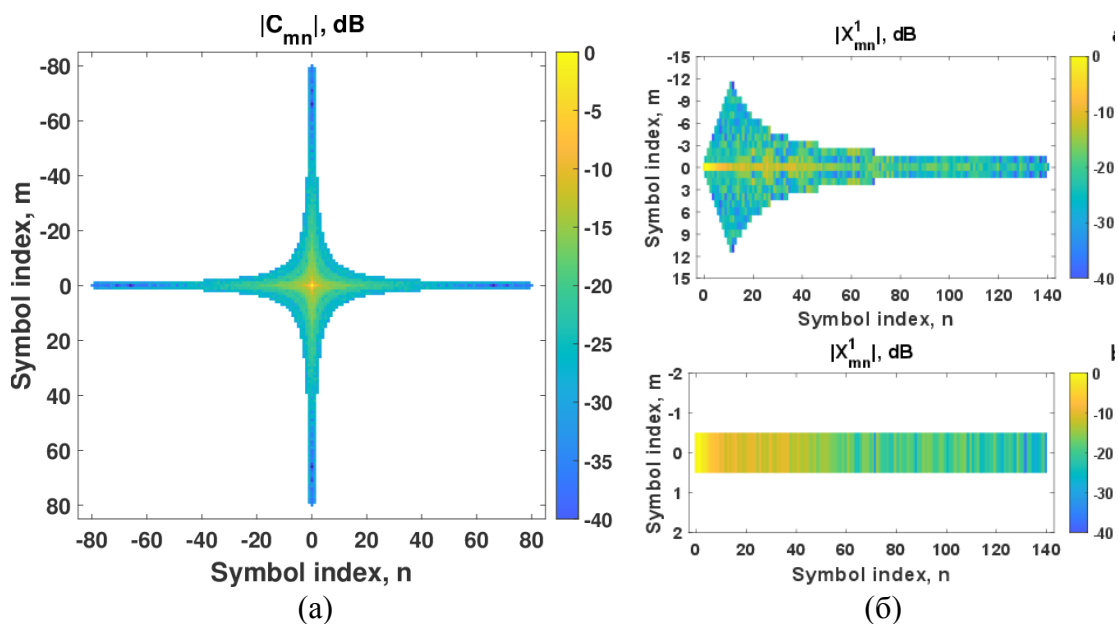


Рис.2. (а) Найденные коэффициенты матрицы возмущений  $C_{m,n}$  с условием  $|m \cdot n| < 80$  при начальной мощности сигнала 3 dBm (б) найденные коэффициенты матрицы  $X_{m,n}^1$  межканального взаимодействия для сектора (вверху) и линии (внизу) при начальной мощности сигнала 3 dBm

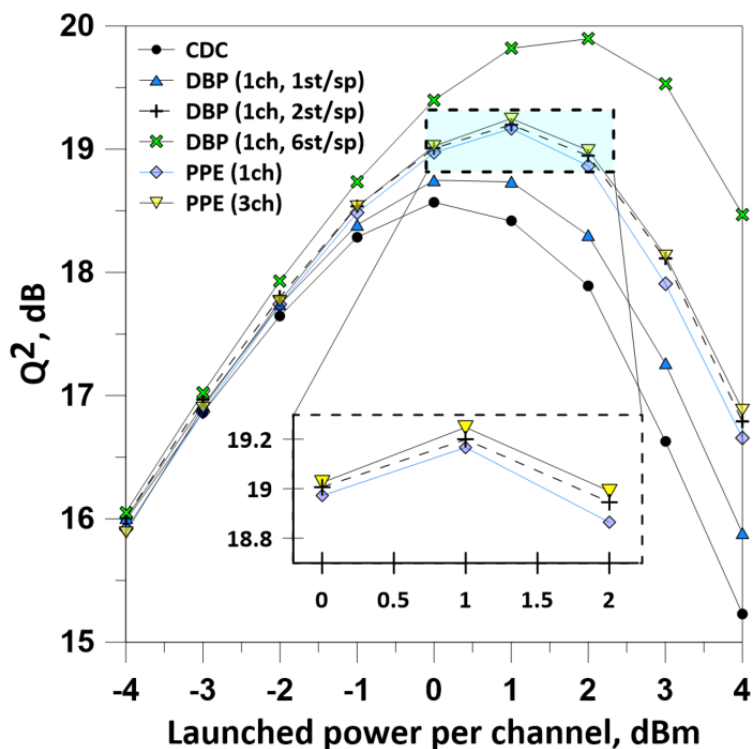


Рис.3. Зависимость Q2 фактора от мощности сигнала.

На рис. 3:

CDC – линейный эквалайзер с выровненной хроматической дисперсией;

DBP (1ch, 1st/sp) – метод обратного распространения сигнала для расчета 1 шага на пролет;

DBP (1ch, 2st/sp) – метод обратного распространения сигнала для расчета 2х шагов на пролет;

DBP (1ch, 6st/sp) – метод обратного распространения сигнала для расчета 6 шагов на пролет;

PPE (1ch) – использование метода возмущений для компенсации внутриканальных искажений.

PPE (3ch) – использование метода возмущений для компенсации межканальных искажений.

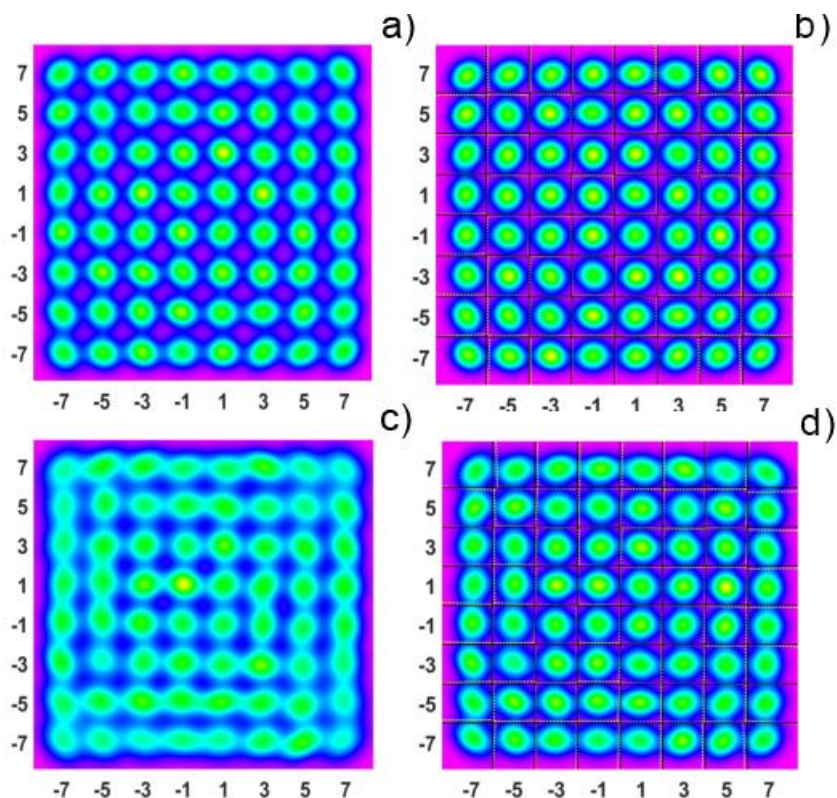


Рис.4. Сигнальная конstellяционная диаграмма 64-QAM для мощности переданного сигнала 1dBm (a,b) и 3dBm (c,d) до обработки (левая колонка) и после применения метода компенсации межканального взаимодействия и применением метода машинного обучения K-means для кластеризации данных (правая колонка).

#### **6. Эффект от использования кластера в достижении целей работы.**

Использование оборудования ИВЦ НГУ позволило провести численное моделирование расширенной модели теории возмущения для компенсации нелинейных искажений в оптическом волокне с несущественным увеличением численной сложности, которая позволяет осуществить компенсацию внутриканальных и межканальных нелинейных искажений. Руководствуясь обратной теорией возмущений, разработана модификация прямой модели возмущения, учитывающая нелинейные взаимодействия между символами из соседних спектральных каналов. Применены методы машинного обучения, такие как линейная регрессия, с регуляризацией для совместной идентификации коэффициентов возмущения, которые отвечают за внутри- и межканальные взаимодействия. Предложенный метод для компенсации нелинейных искажений реализован при передаче данных в оптоволокне 3x400 Гбит/с WDM DP-64QAM с протяженностью 1200 км. Показано улучшение Q2 фактора на 0,83 дБ и 0,51 дБ по сравнению с выровненной хроматической дисперсией (CDC) и методом обратного распространения (DBP) в случае внутриканальной передачи сигнала при расчете 2 шага на пролет.

#### **7. Перечень публикаций, содержащих результаты работы.**

Kozulin I. A., Redyuk A.A. Interchannel nonlinearity compensation using a perturbative machine learning technique // Optics Communications (подана в печать, импакт-фактор 2.125).