

Отчёт о проделанной работе с использованием оборудования ИВЦ НГУ

1. Тема работы

Разработка метода компенсации нелинейных искажений оптического сигнала, распространяющегося по магистральным волоконным линиям связи, на основе теории возмущений и машинного обучения

2. Аннотация

Нелинейные искажения оптического сигнала, возникающие при его распространении по волоконно-оптическим линиям связи, создают существенные ограничения для дальнейшего развития волоконных систем связи, работающих на больших скоростях передачи информации. Чтобы снизить влияние этого явления, был предложен метод компенсации внутриканальных и межканальных нелинейных искажений оптического сигнала для волоконных систем связи со спектральным уплотнением каналов. В его основе лежит дискретная модель, связывающая переданные и принятые информационные символы, построенная на анализе возмущений первого порядка системы уравнений Манакова. Реализация метода осуществляется с помощью решения задачи линейной регрессии с целевой функцией метода наименьших квадратов. На примере трёхканальной системы связи протяжённостью 2000 км и канальной скоростью передачи 240 Гбит/с показано, что эффективность предлагаемого метода превосходит эффективность линейного восстановления фазы принятого сигнала и находится на уровне метода обратного распространения сигнала с использованием одного шага на пролёт.

3. Состав коллектива

- Редюк Алексей Александрович, Институт вычислительных технологий СО РАН, к.ф.-м.н.
- Сидельников Олег Сергеевич, Новосибирский государственный университет, к.ф.-м.н.
- Аверьянов Евгений Александрович, Новосибирский государственный университет
- Федорук Михаил Петрович, Новосибирский государственный университет, д.ф.-м.н., академик РАН, профессор
- Турицын Сергей Константинович, Институт фотонных технологий Университета Астона (Великобритания), PhD, профессор

4. Научное содержание работы

4.1. Постановка задачи и современное состояние проблемы

Нелинейные искажения оптического сигнала, возникающие при его распространении по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС), остаются одним из основных ограничивающих факторов, препятствующих дальнейшему увеличению дальности и скорости передачи информации по ВОЛС [1]. В особенности это касается современных когерентных систем связи со спектральным уплотнением каналов (WDM

систем), подверженных, помимо внутриканальных, также и межканальным нелинейным взаимодействиям. Для уменьшения влияния данного эффекта на качество передачи информации было предложено и исследовано несколько классов методов подавления и компенсации нелинейных искажений. Среди них можно выделить следующие: методы обратного распространения сигнала (Digital Back Propagation, DBP) [2], основанные на численном решении нелинейного уравнения Шрёдингера в обратном направлении; методы, основанные на использовании функционального ряда Вольтерра [3]; методы предискажения сигнала и посткомпенсации нелинейных эффектов (Perturbation-based Post Equalization, PPE) [4, 5], основанные на использовании элементов теории возмущений. Однако практическое применение этих методов сопряжено с рядом трудностей, главным образом связанных с их высокой вычислительной сложностью а, следовательно, невозможностью их аппаратной реализации и использования в режиме реального времени. Данная проблема потенциально может быть решена с помощью привлечения обширного арсенала методов машинного обучения. Данное направление бурно развивается и находит большое число применений в области нелинейной фотоники в последние несколько лет [6, 7, 8].

В работе [9] авторы рассматривают модель внутриканальных и межканальных нелинейных взаимодействий на примере распространения оптического сигнала, состоящего из двух спектральных каналов с использованием двух поляризаций в каждом канале. Для компенсации нелинейных искажений переданного сигнала с помощью предлагаемой модели на основе теории возмущений необходимо вычислить тысячи коэффициентов возмущений, выраженных многомерными осциллирующими интегралами, число которых только растёт с увеличением числа каналов. В работе [10] авторами предлагается вместо численного интегрирования для нахождения коэффициентов использовать методы регрессионного анализа. Показано, что такой подход демонстрирует высокую эффективность метода при значительно уменьшенной вычислительной трудоёмкости для оптических систем связи с пространственным уплотнением каналов по модам сигнала. В рамках данной работы мы обобщаем и применяем этот метод для компенсации внутриканальных и межканальных нелинейных эффектов в системах связи со спектральным уплотнением каналов, используя информацию с соседних по частоте каналов, чтобы восстановить изначальный сигнал.

4.2. Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы

Анализ возмущений первого порядка уравнений Манакова, используемых для моделирования распространения по волоконному световоду оптического сигнала с двумя возбуждёнными поляризациями, позволяет перейти от непрерывной модели на комплексную огибающую сигнала к дискретной модели, связывающей символы на передатчике и символы на приёмнике [9]:

$$X_k = x_k + \Delta x_k, Y_k = y_k + \Delta y_k, \quad (4.1)$$

где x_k и y_k -- комплексные амплитуды импульсов во временном слоте k на передатчике для x - и y -поляризации соответственно, аналогично X_k и Y_k -- комплексные амплитуды импульсов на приёмнике. Величины Δx_k и Δy_k -- некоторая оценка накопленных за время распространения сигнала по волокну нелинейных искажений, учитывающая кубическую нелинейность среды и основанная на взаимодействии троек импульсов с двух поляризаций. В случае учёта одного спектрального канала данная оценка даёт следующее выражение [5]:

$$\Delta x_k = \sum_{m,n} C_{mn} (x_{k+m} x_{k+n} x_{k+m+n} + x_{k+m} y_{k+n} \bar{y}_{k+m+n}), \quad (4.2)$$

где верхнее подчёркивание обозначает комплексное сопряжение. Аналогичные выражения для y -поляризации получаются заменой символов x на y и наоборот. Коэффициенты C_{mn} из 4.2 — комплексные коэффициенты возмущений, зависящие от характеристик волокна, сигнала и протяжённости линии. Аналитические выражения для C_{mn} в виде многомерных интегралов можно найти в работах [9, 10, 11]. В случае учёта нескольких спектральных каналов, распространяющихся одновременно, выражение 4.2 можно обобщить, оно представлено в [12].

В частных случаях можно получить компактные приближенные аналитические выражения для коэффициентов C_{mn} [13], однако в случаях, интересных с практической точки зрения, вычисление коэффициентов требует ресурсозатратного численного интегрирования. Основная идея предлагаемого в статье метода состоит в поиске коэффициентов возмущений C_{mn} и D_{mn}^c (матрицы возмущений учёта соседних каналов) с помощью методов машинного обучения на заранее известном тренировочном наборе передаваемых и принятых символов. После этапа обучения найденные коэффициенты применяются уже на тестовом наборе для компенсации накопленных нелинейных эффектов и восстановления переданных символов по правилу:

$$x_k = X_k - \Delta x_k, y_k = Y_k + \Delta y_k. \quad (4.3)$$

Для оценки эффективности предлагаемого метода посткомпенсации нелинейных искажений, основанного на возмущениях первого порядка (PPE), были выполнены численные эксперименты передачи данных по ВОЛС, принципиальную схему и все параметры которой можно найти в работе [12]. Моделировалось распространение оптического сигнала, состоящего из трёх спектральных каналов с двумя возбуждёнными поляризациями.

4.3. Полученные результаты и их визуализация

При проведении численных экспериментов всегда выполнялось два независимых расчёта с различными реализациями случайных последовательностей символов на передатчике и величин, моделирующих шумы усилителей: один расчёт для получения тренировочной последовательности символов (для вычисления коэффициентов возмущений) и один расчёт для получения тестовой последовательности символов (для тестирования предлагаемого метода).

Для нахождения коэффициентов возмущений C_{mn} и D_{mn}^c формировалась система линейных алгебраических уравнений на основе тренировочной последовательности и ставилась задача линейной регрессии. Для её решения использовались функционалы, соответствующие методу наименьших квадратов, гребневой регрессии, методу LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator). Их оптимизация осуществлялась методом среднего стохастического градиента [14], что позволило выполнять вычисления в комплексной арифметике. Поиски коэффициентов с разными целевыми функционалами показали близкие результаты и основным отличием их применения является сложность вычисления, поэтому мы остановились в своей работе на методе наименьших квадратов как на самом простом и наиболее изученном методе.

По причине дисперсионного уширения импульсов при распространении по волокну и влияния импульсов из соседних временных интервалов на рассматриваемый импульс эффективность метода PPE зависит от параметра R , который определяет диапазон суммирования в 4.2 по правилу $|m| + |n| \leq R$. С увеличением R эффективность метода монотонно растёт, пока не достигает порогового значения, которое сохраняется при дальнейшем росте R . На рисунке 4.1 представлен характерный вид матриц C_{mn} и D_{mn}^1 для ограничений $|m| + |n| \leq 35$ и $|m| + |n| \leq 25$ соответственно. Как видно, матрицы имеют выделяющиеся линии вдоль осей $m = 0$ и $n = 0$, что свидетельствует о том, что

наибольшее влияние на импульс в своём временном слоте имеет он сам, в сравнении с импульсами в других временных слотах. При удалении от центра $m = n = 0$ абсолютная величина коэффициентов экспоненциально уменьшается вплоть до полного обнуления, что говорит о конечном дисперсионном наплывании соседних импульсов друг на друга.

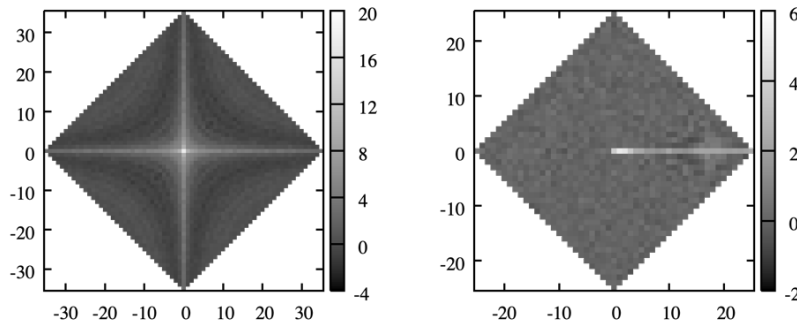


Рис. 4.1. Мнимая часть коэффициентов возмущений. Слева матрица C_{mn} , справа D_{mn}^1 .

Для оценки эффективности предлагаемого метода PPE он сравнивался с другими методами компенсации нелинейных искажений: линейным компенсатором, который только восстанавливает фазу принятого сигнала (Phase-Shift Equalization, PSE), и методом обратного распространения сигнала с использованием одного (DBP1) и двух (DBP2) вычислительных шагов по эволюционной переменной на один пролёт. На рисунке 4.2 представлена зависимость коэффициента битовой ошибки (BER) от вводимой в волокно канальной мощности для четырёх рассматриваемых методов компенсации нелинейных искажений. Из графика видно, что метод PPE, обгоняя PSE, работает на одном уровне с DBP1 и достигает наименьшего показателя коэффициента ошибки $4,7 \cdot 10^{-3}$ при мощности сигнала 0,5 дБм. Следует отметить, что с увеличением количества шагов на пролет для метода обратного распространения сигнала коэффициент битовых ошибок уменьшается, но в то же время пропорционально растет вычислительная сложность данного метода.

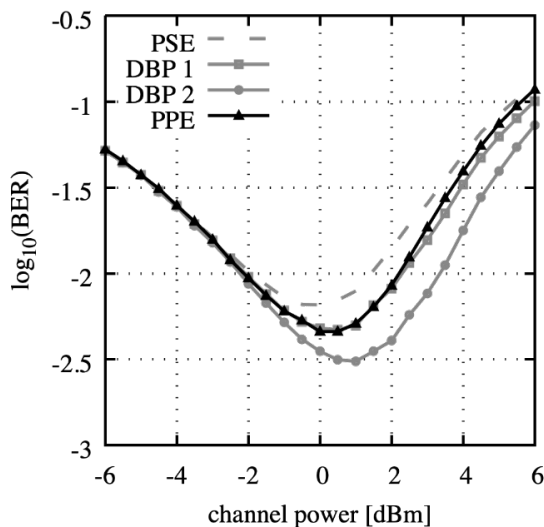


Рис. 4.2. Зависимость коэффициента битовой ошибки от канальной мощности вводимого сигнала для различных методов компенсации нелинейных искажений.

На рисунке 4.3 представлена зависимость коэффициента битовой ошибки от длины распространения сигнала при оптимальной мощности сигнала для каждой длины. На графике изображены линии, соответствующие тем же методам компенсации искажений, что и на рисунке 4.2. Следует отметить, что при передаче сигналов на расстояние порядка 1000–1400 км эффективность предлагаемого метода PPE оказывается выше метода обратного распространения с использованием одного шага на пролет DBP1. Видно, что в случае применения техники коррекции ошибок (FEC) из работы [15] с фиксированным пороговым значением BER, при котором ещё возможно его использование, метод PPE позволяет увеличить расстояние передачи на 200 км с 1800 км до 2000 км при сохранении того же уровня ошибок по сравнению с методом PSE.

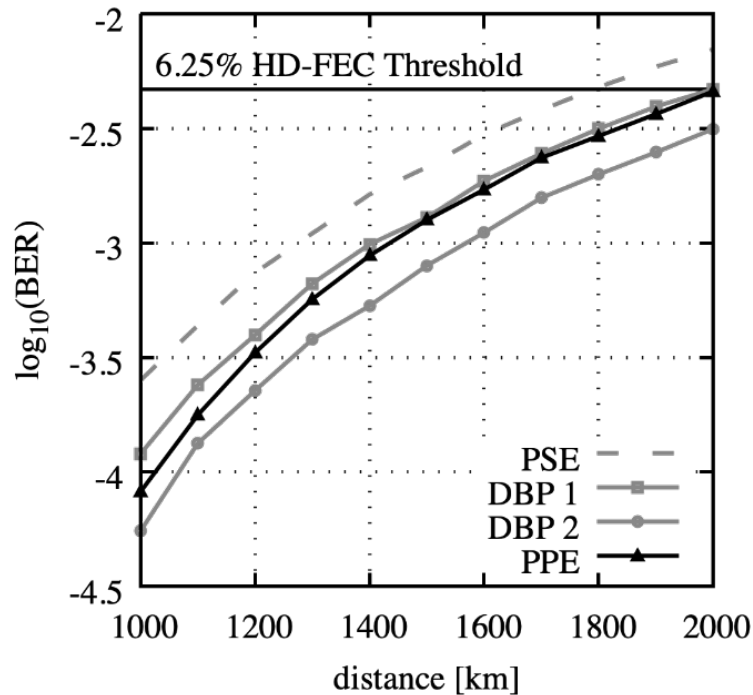


Рис. 4.3. Зависимость коэффициента битовой ошибки от длины распространения для различных методов компенсации нелинейных искажений.

Важно отметить, что хотя метод DBP1 и демонстрирует результат, близкий к методу PPE, его вычислительная сложность остаётся высокой, что мешает его практическому применению. В то же время PPE лишён такого недостатка, что делает его подходящим кандидатом для компенсации нелинейных искажений в современных когерентных ВОЛС. Кроме того, метод PPE допускает периодическое переобучение через определенные интервалы времени, что позволяет использовать его в линиях связи с динамически изменяемыми параметрами, в то время как метод обратного распространения может применяться только в статических системах.

Список литературы

1. Temprana E., Myslivets E., Kuo B.P.-P., Liu L., Ataiel V., Alic N., Radic S. Overcoming Kerr-induced capacity limit in optical fiber transmission // Science. – 2015. – Vol. 348(6242). – P.1445-1448.
2. Ip E. Nonlinear compensation using backpropagation for polarization-multiplexed transmission // Journal of Lightwave Technology. – 2010. – Vol. 28(6). – P.939-951.

3. Liu L., Li L., Huang Y. Intrachannel nonlinearity compensation by inverse Volterra series transfer function // *Journal of Lightwave Technology*. – 2012. – Vol. 30(3). – P.310-316.
4. Oyama T., Nakashima H., Oda S., Yamauchi T., Tao Z., Hoshida T., Rasmussen J.C. Robust and efficient receiver-side compensation method for intra-channel nonlinear effects // *Proceedings of Optical Fiber Communication Conference*. – San Francisco, 2014. – Paper Tu3A.3
5. Tao Z., Dou L., Yan W., Li L., Hoshida T., Rasmussen J.C. Multiplier-free intrachannel nonlinearity compensating algorithm operating at symbol rate // *Journal of Lightwave Technology*. – 2011. – Vol. 29(17). – P. 2570-2576.
6. Zibar D., Piels M., Jones R., Schaeffer C.G. Machine learning techniques in optical communication // *Journal of Lightwave Technology*. – 2016. – Vol. 34(6). – P.1442-1452.
7. 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. – Vol. 47(12). – P.1147-1149.
8. Metaxas A., Redyuk A., Sun Y., Shafarenko A., Davey N., Adams R. Support vector machines for error Correction in Optical Data Transmission // *Lecture Notes in Computer Science*. – 2013. – Vol. 7824. – P.438-445.
9. Dar R., Feder M., Mecozzi A., Shtauf M. Inter-channel nonlinear interference noise in WDM systems: modeling and mitigation // *Journal of Lightwave Technology*. – 2015. – Vol. 33(5). – P. 1044-1053.
10. Sorokina M., Sygletos S., Turitsyn S. Sparse identification for nonlinear optical communication systems: SINO method // *Optics Express*. – 2016. – Vol. 24. – P. 30433-30443.
11. Mecozzi A. A unified theory of intrachannel nonlinearity in pseudolinear transmission // *Impact of Nonlinearities on Fiber Optic Communications* / ed. Kumar S. New York, NY: Springer New York, 2011. P. 253-291.
12. Redyuk A.A., Sidelnikov O.S., Averyanov E.A., Sorokina M.A., Fedoruk M.P., Turitsyn S.K. Perturbative machine learning technique for nonlinear impairments compensation in fiber optic communication systems // *Applied Photonics*. – 2018. – Vol. 5(3). – P.265-276.
13. Ghazisaeidi A., Essiambre R.-J. Calculation of coefficients of perturbative nonlinear pre-compensation for Nyquist pulses // *Proceedings of European Conference on Optical Communication*. – Cannes, 2014. – P.1-3.
14. Schmidt M., Le Roux N., Bach F. Minimizing finite sums with the stochastic average gradient // *Mathematical Programming*. – 2017. – Vol. 162(1). – P.83-112.
15. Zhang L.M., Kschischang F.R. Staircase codes with 6% to 33% overhead // *Journal of Lightwave Technology*. – 2014. – Vol. 32(10). – P.1999-2001.

5. Эффект от использования кластера в достижении целей работы

При решении подобных задач из области волоконно-оптической связи зачастую требуется использование сверхдлинных битовых последовательностей (2^{19} битов). В данной задаче это требование обусловлено использованием методов машинного обучения для нахождения коэффициентов и размером возникающей системы линейных

алгебраических уравнений. Учитывая, что распространение данных битовых последовательностей нужно независимо моделировать для большого набора мощностей сигнала, а также отдельно для обучающей и тестовой последовательности, особую важность приобретает возможность использования ресурсов ИВЦ НГУ. Один типичный численный расчет описанной задачи, как правило, длится порядка нескольких часов с использованием одного процессора кластера. Имея возможность задействовать 20 и более процессоров одновременно, скорость работы с использованием кластера возрастает в десятки раз по сравнению с работой на персональном компьютере.

6. Перечень публикаций, содержащих результаты работы (если есть). Если имеется, указать импакт-фактор журнала (Thomson Reuters, РИНЦ,...).

1. E. Averyanov, A. Redyuk, O. Sidelnikov, M. Sorokina, M. Fedoruk, and S. Turitsyn, Perturbative machine learning technique for nonlinear impairments compensation in WDM systems // Proceedings of European Conference on Optical Communication. - Rome, 2018. - Paper Th2.39.
2. A.A. Redyuk, O.S. Sidelnikov, E.A. Averyanov, M.A. Sorokina, M.P. Fedoruk, S.K. Turitsyn Perturbative machine learning technique for nonlinear impairments compensation in fiber optic communication systems // Applied Photonics. – 2018. – Vol. 5(3). – P.265-276.
3. Аверьянов Е.А., Редюк А.А., Сидельников О.С., Федорук М.П. Компенсация нелинейных искажений сигнала с пониженной вычислительной сложностью на основе теории возмущений // Фотон-Экспресс. – 2019. – №6. - с.106-107.
4. A. Redyuk, E. Averyanov, O. Sidelnikov, M. Fedoruk, and S. Turitsyn Compensation of Nonlinear Impairments Using Inverse Perturbation Theory with Reduced Complexity // Journal of Lightwave Technology. – 2020. – Vol. 38(6). – P.1250-1257. (Web of Science, IF=4.162)

7. Впечатления от работы вычислительной системы и деятельности ИВЦ НГУ, а также предложения по их совершенствованию

Как уже отмечалось в предыдущих подобных отчётах, среди положительных моментов, связанных с функционированием ИВЦ НГУ, хотелось бы выделить следующие:

- Наличие удобно организованного сайта www.nusc.ru, содержащего ответы на многие возникающие вопросы, касающиеся доступа к ресурсам ИВЦ НГУ и использования установленного ПО;
- Возможность напрямую обратиться к администратору кластера и оперативно получить нужный ответ или рекомендацию;
- Отлаженная система оповещения пользователей о предстоящих изменениях в работе кластера.

Отдельно группа соавторов благодарит ведущего инженера НГУ Владислава Анатольевича Калужного за его постоянную помощь и отзывчивость при совместной работе.