

Отчет о проделанной работе с использованием оборудования ИВЦ НГУ

1. Тема работы:

Моделирование распространя сигналов в оптических волоконных линиях связи

2. Аннотация:

Постоянный рост объемов передачи информации по оптическим каналам много лет обеспечивался ростом скорости передачи данных, путем повышения частоты модуляции. В настоящее время эта частота достигла терагерцового диапазона, где становятся существенными дисперсионные и нелинейные искажения сигнала в оптическом волокне. Для устранения нелинейно-дисперсионных искажений сигнала был предложен способ «back propagation», т.е. восстановление исходного сигнала путем численного решения «назад» по линии уравнения, описывающего эволюцию огибающей поля в оптическом волокне. Это уравнение (в скалярном случае) оказалось нелинейным уравнением Шредингера (НУШ), для решения которого существует ряд численных методов, в частности Split Step Fourier Method (SSFM). Однако SSFM и другие численные методы, основанные на разностной аппроксимации НУШ, оказались недостаточно эффективны для практических приложений. Более эффективный способ решения предлагает метод обратной задачи рассеяния (ОЗР). Для этого метода совсем недавно в институте Автоматики и Электрометрии СО РАН были разработаны быстрые алгоритмы решения прямой и обратной задач рассеяния, основанные на теплицевой симметрии алгебраизованной системы интегральных уравнений Гельфанда – Левитана – Марченко.

В данной работе впервые для задачи передачи информации по оптической линии проводится сравнение численных решений НУШ, полученных методом SSFM и методом, основанным на решении прямой и обратной задач рассеяния, для случая нормальной дисперсии. Исследуются пределы применимости и ограничения ОЗР-метода, возникающие из-за плохой обусловленности обратных задач.

3. Состав коллектива:

Богданов Степан Александрович, студент, лаборант-исследователь, Лаборатория нелинейной фотоники НГУ, исполнитель

Фрумин Леонид Лазаревич, д. ф.-м. н., в.н.с., ФГБУН Институт автоматики и электрометрии СО РАН, руководитель

4. Информация о гранте:

РНФ №17-72-30006, руководитель - Турицын Сергей Константинович

4. Научное содержание работы:

Результаты этой работы были включены студентом Богдановым Степаном Александровичем в его магистерскую диссертацию. Далее приводится текст соответствующей главы диссертации.

Применение методов прямой и обратной задачи рассеяния в системах обработки сигналов волоконно-оптической линии связи

Одним из возможных методов решения НУШ является метод, основанный на решении прямой и обратной задачи рассеяния, полученный в 1974 году в работах Захарова

и Шабата [1]. Суть прямой и обратной задачи рассеяния (ПЗР и ОЗР) состоит в нахождении нелинейного спектра по заданному сигналу и наоборот. Дело в том, что эволюции сигнала при распространении его по волоконно-оптической линии связи, соответствует тривиальная эволюция его нелинейного спектра, которая описывается соответствующим фазовым множителем:

$$Q(L, \omega) = Q(0, \omega)e^{-2i\omega^2 L}, \quad (1)$$

где $Q(\omega)$ – нелинейный спектр, L – длина линии, ω – частота.

Схематично решение НУШ с помощью метода ПЗР и ОЗР можно представить, как показано на схеме (рис. 1).

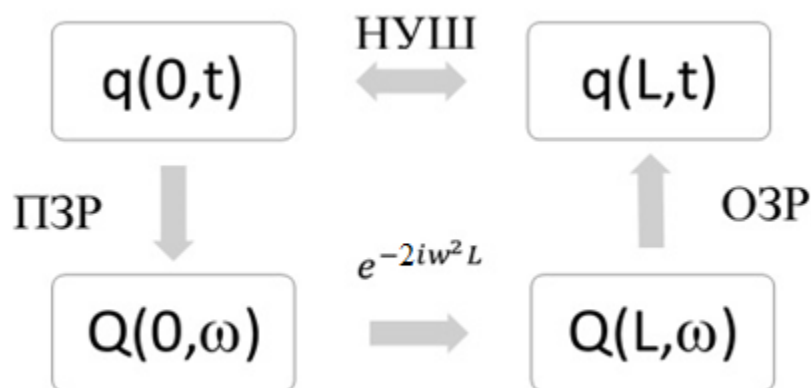


Рис. 1. Схематичное представление решения НУШ методом прямой и обратной задач рассеяния. $q(0, t)$, $q(L, t)$ – сигнал в начале и конце линии; $Q(0, \omega)$, $Q(L, \omega)$ – нелинейный спектр в начале и конце линии; ПЗР, ОЗР – прямая и обратная задачи рассеяния.

Оптический сигнал при распространении по волоконно-оптической линии связи испытывает на себе действие нелинейности и дисперсии, что приводит к искажению его формы. Это делает невозможным непосредственное восстановления данных из принятого сигнала и требует предварительного приведения его к форме, той которую он имел в начале линии. Для решения этой задачи существует процедура обратного распространения (или back propagation), подразумевающая решения НУШ назад вдоль линии. Однако для восстановления данных в режиме online требуются быстрые методы решения НУШ, одним из которых является метод основанный на решении прямой и обратной задачи рассеяния [3-9].

В данном разделе исследуется возможность применения методов ПЗР и ОЗР для решения задачи обратного распространения и производится сравнение с методом расщепления по физическим процессам.

Исследуемая линия

В данном численном эксперименте рассматривалась волоконно-оптическая линия связи, сигнал при распространении в которой описывается НУШ. Параметры линии были выбраны такими, чтобы в ней мог распространяться OFDM-сигнал (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), таблица 1.

Таблица 1. Параметры линии связи.

Параметр	Значение
β_2 , дисперсия групповых скоростей	20 пс ² /км
γ , коэффициент нелинейности	1.3 Вт ⁻¹ км ⁻¹
L , длина линии	2000 км

OFDM-сигнал

Типичный OFDM-сигнал состоит из множества ортогональных одночастотных сигналов (поднесущих), которые складываются в один и используются для модуляции несущей частоты. Так как каждая поднесущая состоит из двух компонент синфазной и квадратурной, то для кодирования информации используются обычные схемы: QAM, PSK, ASK. Основным преимуществом OFDM-системы передачи данных является низкая символьная скорость, связанная с тем, что исходный поток данных делится на много параллельных потоков (до 1000). Низкая символьная скорость позволяет, в свою очередь, существенно снизить помехи в линии за счет увеличения длительности импульса и защитного интервала [10-12].

Типичный сигнал применяемый в данной работе представлен на рис. 2 с параметрами, приведенными в таблице 2.

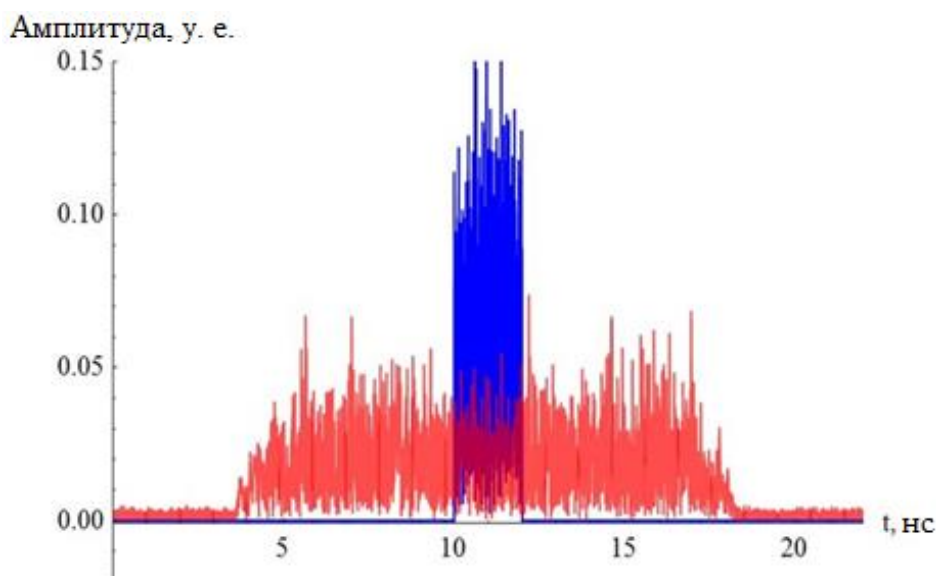


Рис. 2. OFDM-сигнал, используемый в работе. Синий – в начале линии, красный – в конце линии.

На рис. 2 изображен временной профиль OFDM-сигнала в начале линии и в конце линии. Существенное уширение импульса связано с действием дисперсионных и нелинейных эффектов.

Таблица 2. Параметры OFDM-сигнала, представленного на рис. 2.

Параметры сигнала	Значение
Длительность, T	2 нс
Мощность, P	1 мВт

Число поднесущих	1000
Длина линии, L	200 км
SNR	20

В данном исследовании применялись сигналы с QPSK-схемой модуляции.

Сравнение с SSFM-методом

Для сравнения эффективности работы алгоритма, основанного на ПЗР и ОЗР, и метода расщепления по физическим процессам по линии, описанной выше, моделировалось распространения OFDM-сигнала с параметрами, приведенными в таблице 3.

Таблица 3. Параметры OFDM-сигнала.

Параметры сигнала	Значение
Длительность, T	2 нс
Мощность, P	1 мВт
Число поднесущих	1000
Длина линии, L	2000 км
SNR	20

Распространение вперед, т.е. прямая эволюция сигнала осуществлялась методом SSFM, что позволяло учитывать влияние шума, прибавляя на каждом шаге по эволюционной переменной слагаемое с шумом: так получался сигнал в конце линии по заданному сигналу в начале. Обратное распространение производилось двумя методами: SSFM и методами, основанными на ПЗР и ОЗР.

В качестве конкретной реализации методов решения НУШ, основанных на ПЗР и ОЗР, использовался, так называемый ТИВ-алгоритм. У этого алгоритма есть существенное преимущество перед другими алгоритмами решения ПЗР и ОЗР, связанное с меньшей вычислительной сложностью благодаря используемой симметрии теплицевых матриц, к обращению которых сводится решения системы уравнений Гельфанда-Левитана-Марченко [13,14].

Интерес к этим двум методам обусловлен в первую очередь разностью в их вычислительной сложности. Так для метода SSFM сложность определяется числом точек дискретизации сигнала – N и числом шагов вдоль линии – M и составляет $MN \log N$, где $N \log N$ – соответствует вычислительной сложности быстрого преобразования Фурье. Сложность же ТИВ-алгоритма равна N^2 , где N – также число точек дискретизации сигнала, а отсутствие зависимости от длины линии связано с описанной выше тривиальной эволюцией нелинейного спектра при распространении сигнала.

Также важно упомянуть о недостатках ТИВ-метода, которые состоят в необходимости использовать сигнал с нулевой асимптотикой на бесконечности, а также потребность в большом количестве точек дискретизации (oversampling factor).

Из полученных двумя способами сигналов восстанавливались данные и сравнивались. На рисунке 3 приведены констеляционные диаграммы после процедуры обратного распространения для различных значений SNR: 30, 20, 10.

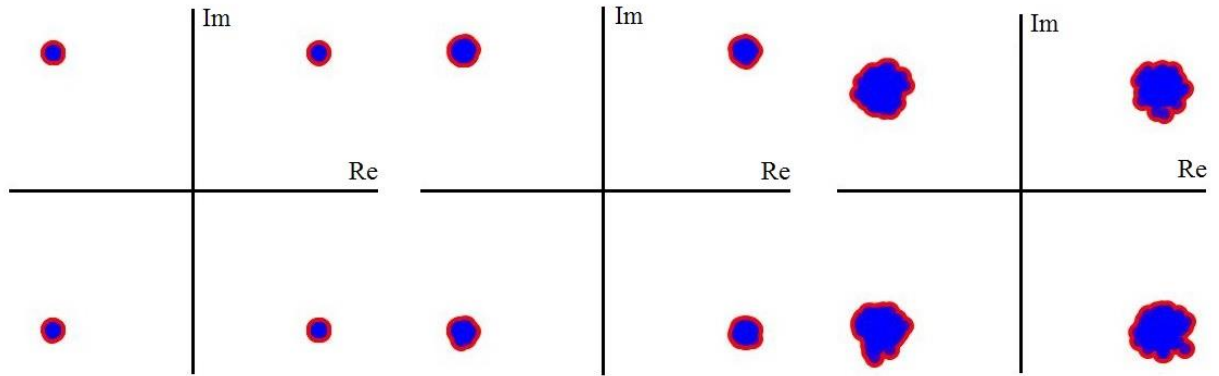


Рис. 3. Коснтеляционные диаграммы для восстановленных OFDM-сигналов после процедуры обратного распространения для значений SNR: 30, 20, 10 – слева направо. Красные точки - метод SSFM, синие – метод, основанный на ПЗР и ОЗР.

На рисунке 3 видно полное соответствие восстановленных данных двумя описанным выше методами. Синие точки (метод ТИВ) точно ложатся на красные (SSFM), которые, как может показаться из рисунка, не имеют большого разброс, а выбраны большого размера. Видно, что даже при существенно малом SNR значения, полученные обоими методами, совпадают с хорошей точностью.

Защитный интервал

Также проводилось распространение серий по три последовательно расположенных импульса (таких как на рис. 2) с различными защитными интервалами: 4 нс и нулевым защитным интервалом. Так на рис. 4 приведены полученные констеляционные диаграммы для этого режима.

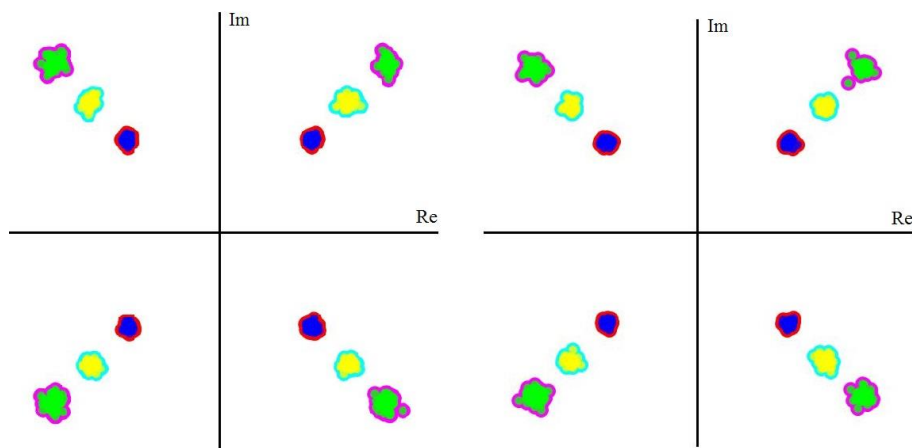


Рис. 4. Коснтеляционные диаграммы для восстановленных последовательностей из трех OFDM-сигналов после процедуры обратного распространения для SNR=20. Слева для защитного интервала 4 нс, справа – без защитного интервала. Три разноудалённых от центра группы точек соответствуют первому, второму и третьему импульсу в серии соответственно. Красные, голубые и сиреневые точки - метод SSFM; синие, желтые и зеленые – метод, основанный на ПЗР и ОЗР.

Из рисунка 4 видно, что величина защитного интервала не влияет существенно образом на эффективность работы ТИВ и SSFM методов. Также видно, что расположение импульса в серии: будь он расположенным с краю или в центре, также не влияет на эффективность декодирования данных.

Заключение

В этом разделе исследовался вопрос применимости метода, основанного на ПЗР и ОЗР для решения задачи обратного распространения и сравнивалась эффективность его работы с методом SSFM. В ходе численного эксперимента было продемонстрировано сходство в результатах, полученных обоими методами, что показало возможность применения ПЗР и ОЗР методов.

С учетом особенностей в вычислительной сложности ТИВ-алгоритма: независимость вычислительной сложности от длины линии, он может быть эффективно применен в ряде задач, где $MN \log N > N^2$ (N – число точек дискретизации сигнала, M – число шагов по эволюционной переменной для SSFM-метода), обеспечивая, таким образом, большую эффективность систем обработки сигналов.

Список литературы, используемый в работе

- [1] Shabat A., Zakharov V. Exact theory of two-dimensional self-focusing and one-dimensional self-modulation of waves in nonlinear media //Soviet physics JETP. – 1972. – Т. 34. – №. 1. – С. 62.
- [2] Prilepsky J. E., Derevyanko S. A., Turitsyn S. K. Nonlinear spectral management: Linearization of the lossless fiber channel //Optics express. – 2013. – Т. 21. – №. 20. – С. 24344-24367.
- [3] Yousefi M. I., Kschischang F. R. Information transmission using the nonlinear Fourier transform, Part I: Mathematical tools //IEEE Transactions on Information Theory. – 2014. – Т. 60. – №. 7. – С. 4312-4328.
- [4] Yousefi M. I., Kschischang F. R. Information transmission using the nonlinear Fourier transform, Part II: Numerical methods //IEEE Transactions on Information Theory. – 2014. – Т. 60. – №. 7. – С. 4329-4345.
- [5] Yousefi M. I., Kschischang F. R. Information transmission using the nonlinear Fourier transform, Part III: Spectrum modulation //IEEE Transactions on Information Theory. – 2014. – Т. 60. – №. 7. – С. 4346-4369.
- [6] Turitsyna E. G., Turitsyn S. K. Digital signal processing based on inverse scattering transform //Optics letters. – 2013. – Т. 38. – №. 20. – С. 4186-4188.
- [7] Hari S., Kschischang F., Yousefi M. Multi-eigenvalue communication via the nonlinear Fourier transform //2014 27th Biennial Symposium on Communications (QBSC). – IEEE, 2014. – С. 92-95.
- [8] Prilepsky J. E. et al. Nonlinear inverse synthesis and eigenvalue division multiplexing in optical fiber channels //Physical review letters. – 2014. – Т. 113. – №. 1. – С. 013901.
- [9] Le S. T., Prilepsky J. E., Turitsyn S. K. Nonlinear inverse synthesis for high spectral efficiency transmission in optical fibers //Optics express. – 2014. – Т. 22. – №. 22. – С. 26720-26741.
- [10] Giacomidis E. et al. Dual-polarization multi-band optical OFDM transmission and transceiver limitations for up to 500 Gb/s uncompensated long-haul links //Optics express. – 2014. – Т. 22. – №. 9. – С. 10975-10986.

- [11] Le S. T., Blow K., Turitsyn S. Power pre-emphasis for suppression of FWM in coherent optical OFDM transmission //Optics express. – 2014. – Т. 22. – №. 6. – С. 7238-7248.
- [12] Coulson A. J. Bit error rate performance of OFDM in narrowband interference with excision filtering //IEEE transactions on wireless communications. – 2006. – Т. 5. – №. 9. – С. 2484-2492.
- [13] Belai O. V. et al. Efficient numerical method of the fiber Bragg grating synthesis //JOSA B. – 2007. – Т. 24. – №. 7. – С. 1451-1457.
- [14] Frumin L. L. et al. Efficient numerical method for solving the direct Zakharov–Shabat scattering problem //JOSA B. – 2015. – Т. 32. – №. 2. – С. 290-296.

5. Эффект от использования кластера:

Моделирование системы осуществлялось с использованием пакета Mathematica, объемные вычисления в котором требуют существенных численных ресурсов. Использование вычислительного кластера позволило сократить время счета и выполнить работу в течение разумного времени.

6. Перечень публикаций, содержащих результаты работы:

1. Богданов С. Моделирование распространения сигналов в оптических волоконных линиях связи // Фотоника и квантовые оптические технологии: Материалы 56-ой Междунар. науч. студ. конф. 22-27 апреля 2018 г. / Новосиб. гос. ун-т. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2018. – 36 с.