

Отчет о проделанной работе с использованием оборудования ИВЦ НГУ

30 декабря 2018 г.

1 Аннотация

Предложен новый подход к кодированию и передаче информации в оптических сигналах непрерывного спектра нелинейного уравнения Шредингера (НУШ). Информация кодируется в данных рассеяния оптического сигнала, а именно, в функции ядра уравнений Гельфанда-Левитана-Марченко (ГЛМ). С помощью численного решения уравнений ГЛМ исследована зависимость характеристик сигнала от параметров кодированного ядра. Проведено статистическое исследование устойчивости предложенного метода кодирования информации к шуму и эффектам дисперсии оптоволокна. Кроме того, исследована фазовая зависимость динамики взаимодействия солитонов в модели Дьяченко-Захарова. Обнаружены важные отличия от модели НУШ, в частности передача энергии между солитонами.

2 Тема работы

Решение прямой и обратной задачи рассеяния в рамках модели нелинейного уравнения Шредингера.

3 Состав коллектива

Гелаш Андрей Александрович, к.ф.-м.н., н.с. ФФ НГУ.

4 Информация о гранте

РНФ, Конкурс 2017 года по мероприятию "Проведение инициативных исследований молодыми учеными" Президентской программы исследовательских проектов, реализуемых ведущими учеными, в том числе молодыми учеными. Грант номер 17-71-10128 "Новые подходы к передаче и кодированию информации на основе метода обратной задачи рассеяния"

5 Научное содержание работы

5.1 Постановка задачи

Проект был направлен на разработку новых численных подходов для решения прямой и обратной задачи рассеяния в рамках модели нелинейного уравнения Шредингера. С помощью разработанных алгоритмов исследовались различные сценарии эволюции нелинейных волновых полей и разрабатывались новые методы передачи информации в оптическом волокне.

5.2 Современное состояние проблемы

Метод обратной задачи рассеяния (МОЗР) является мощным теоретическим инструментом современной математической физики, который позволяет полностью проинтегрировать широкий класс нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, см. монографию [S. Novikov, S. V. Manakov, L. P. Pitaevskii, and V. E. Zakharov, Theory of Solitons: The Inverse Scattering Method, 1984.]. К этому классу относятся такие важные модели нелинейной физики как уравнения КдВ, Sine-Gordon и нелинейное уравнение Шредингера (НУШ).

Модель НУШ описывает распространение слабо модулированного волнового пакета в различных нелинейных средах. Одним из наиболее важных приложений модели НУШ является распространение света в оптическом волокне с Керровской нелинейностью.

МОЗР позволяет построить взаимно-однозначное соответствие между волновым полем и так называемыми данными рассеяния. Данные рассеяния меняются тривиальным образом в процессе нелинейной эволюции волнового поля, что открывает широкие возможности как для фундаментальных исследований, так и для практических приложений. Так, например, зная данные рассеяния можно сделать выводы о причинах формирования когерентных волновых структур в процессе эволюции волнового поля. Практическое применение связано с возможностью передачи информации закодированной в данных рассеяния передаваемого оптического сигнала [2].

Теоретические основы МОЗР для НУШ были разработаны в 70-х и 80-х годах прошлого века [V. E. Zakharov and A. B. Shabat, Sov. Phys. JETP 34, 62 (1972)], Полная схема МОЗР состоит из решения прямой задачи рассеяния (нахождение данных рассеяния по заданному волновому полю) и обратной задачи рассеяния (восстановление волнового поля по данным рассеяния). МОЗР имеет серьезные отличия для разных типов граничных условий, см. монографию [E. D. Belokolos, A. I. Bobenko, A. R. Enol'skii, V. Z. Its, and V. B. Matveev, Algebro-Geometric Approach to Nonlinear Integrable Equations, 1994.]. Разработке численных алгоритмов решения прямой и обратной задач рассеяния в последнее время уделяется очень большое внимание (см. обзор [Sergei K. Turitsyn, Jaroslaw E. Prilepsky, Son Thai Le, Sander Wahls, Leonid L. Frumin, Morteza Kamalian, and Stanislav A. Derevyanko, "Nonlinear Fourier transform for optical data processing and transmission: advances and perspectives," Optica 4, 307-322 (2017)]). Тем не менее, до сих пор не существует полного набора численных алгоритмов позволяющих решить прямую и обратную задачу рассеяния для произвольного волнового поля.

5.3 Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы

Предложен новый подход к кодированию информации в данных рассеяния оптического сигнала, а именно, в функции ядра уравнений Гельфанда-Левитана-Марченко, см. Рис.1. При этом, методом теплицева окаймления численно решается обратная задача рассеяния НУШ и по заданному ядру вычисляется сигнал, который предназначен для распространения в оптоволоконной линии связи. После распространения, для полученного сигнала решается прямая задача рассеяния НУШ. Так как линия связи с хорошей точностью описывается интегрируемой моделью, то эволюция данных рассеяния в процессе распространения сигнала может быть учтена аналитически. Таким образом удается устранить нелинейные искажения сигнала.

Было показано, что использование оконной модуляции ядра непрерывного спектра НУШ позволяет контролировать ширину и амплитуду сигнала, см. Рис.2. Результаты моделирования линии связи с шумом показали хорошую устойчивость предложенного подхода (рассматривался шум 19.7 dB) при распространении сигнала на 1000 км, см. Рис. 3.

Кроме того, исследована фазовая зависимость динамики взаимодействия солитонов в модели Дьяченко-Захарова. Обнаружены важные отличия от модели НУШ, в частности передача энергии между солитонами. Было проведено численное моделирование и установлена зависимость передачи энергии от относительной фазы солитонов. Результаты опубликованы в работе [1].

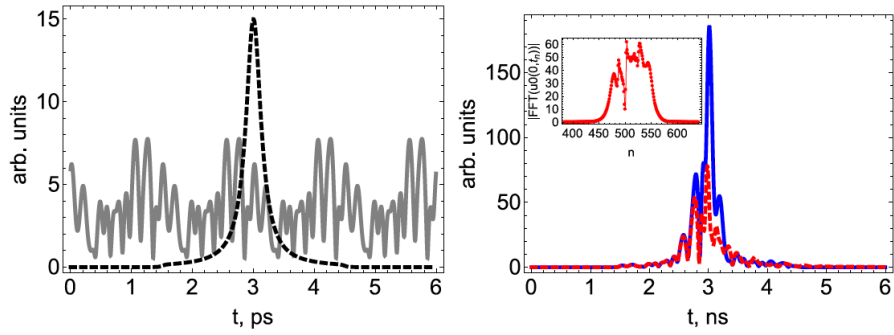


Рис. 1: Слева: 16 закодированных по фазе гармоник ядра уравнения ГЛМ (серая сплошная линия) и оконная функция (черный пунктир). Справа: удвоенное ядро уравнений ГЛМ (красный пунктир) которое получено умножением закодированных гармоник на оконную функцию и соответствующий сигнал (синяя сплошная линия), который получен с помощью численного решения уравнений ГЛМ.

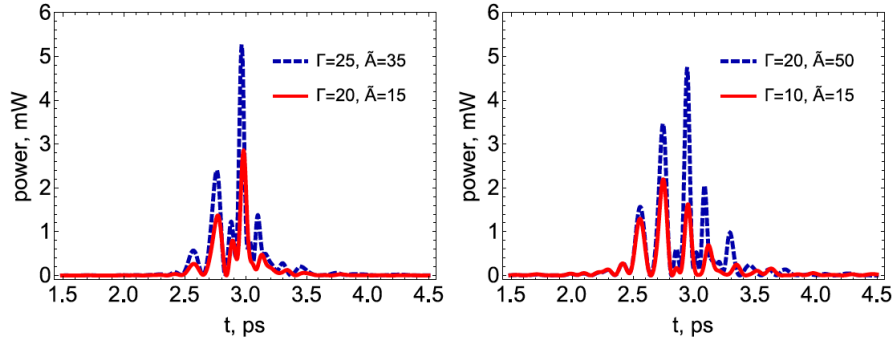


Рис. 2: Зависимость характеристик сигнала от параметров оконной функции. Величина Γ отвечает за характерную ширину, величина A за характерную амплитуду оконной функции.

6 Эффект от использования кластера в достижении целей работы

Для выполнения задач проекта потребовалось масштабное статистическое моделирование распространения сигнала в присутствии случайного шума, а также взаимодействий солитонов с разными начальными фазами. Ресурсы кластера позволили успешно справиться с этой задачей путем параллельного расчета большого количества начальных условий. Кроме того, программное обеспечение Matlab позволило реализовать быстрые алгоритмы обработки данных расчетов на стороне сервера, без выгрузки объемных данных на персональный компьютер.

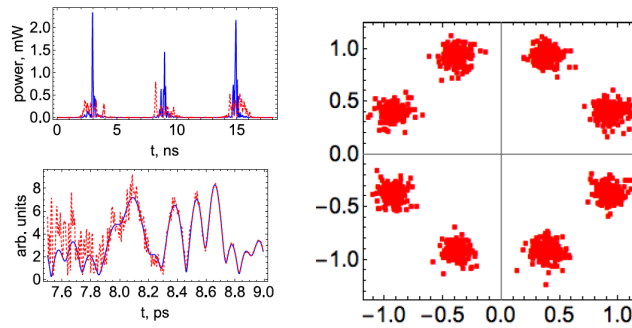


Рис. 3: Распространение сигналов на 1000 км. в модели НУШ с шумом 19.7 дВ. Синие линии соответствуют сигналу и кодированным гармоникам ядра ГЛМ в начале линии, красные пунктирные отвечают сигналу в конце линии и декодированным (по схеме 8-PSK) гармоникам ядра. Рисунок справа демонстрирует статистику декодирования фазы для 1000 случайным образом кодированных сигналов. Видно, что при данном уровне шума возможно однозначное восстановление восьми значений фазы.

7 Перечень публикаций, содержащих результаты работы

[1] Kachulin, D.; Gelash, A. On the phase dependence of the soliton collisions in the Dyachenko–Zakharov envelope equation. *Nonlinear Process. Geophys.* 2018, 25, 553–563. Импакт фактор журнала = 1.3.

Текст публикации содержит благодарность ИВЦ НГУ.