

Отчет о проделанной работе с использованием оборудования ИВЦ НГУ

Тема: Изучение когерентных структур с помощью Нелинейного преобразования Фурье

Аннотация

В данной работе описываются практическое применение численных методов нелинейного преобразования Фурье для анализа нелинейных составляющих стандартных оптических сигналов. В диссертации продемонстрировано, что сигналы с мультиплексированием с частотным разделением каналов (OFDM) и с мультиплексированием с разделением по длине волны (WDM) могут содержать солитонные компоненты, возникшие статистически из-за случайных процессов, соответствующих информационному содержанию. Применяя спектральную задачу Захарова – Шабата, мы количественно оцениваем вероятность появления солитона в таких сигналах. В работе используется квадратурно-амплитудная модуляция (QAM), а количество констелляционных точек меняется от 4 до 1024. Для исследования мы использовали OFDM символ с количеством поднесущих от 16 до 1024 и WDM символ с числом каналов от 9 до 51. Мы наблюдаем, что при мощностях сигнала, оптимальных для передачи, OFDM символ содержит солитоны с высокой вероятностью. Для мощностей, оптимальных для передачи WDM символа, солитоны не возникают, тем не менее они начинают существовать при больших уровнях средних мощностей символа. Также мы обнаружили, что мощность сигнала, при которой в символах начинают существовать солитонные компоненты, зависит от количества используемых каналов. При этом необходимая удельная мощность на один канал не зависит от типа модуляции и общего количества каналов, а определяется форматом и длительностью символа.

Состав коллектива

- Седов Егор Валентинович — магистрант, физический факультет НГУ.
- Федорук Михаил Петрович — ректор НГУ, профессор, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН.
- Турицын Сергей Константинович — профессор Aston Institute of Photonic Technologies, Aston University, Birmingham, UK, доктор физико-математических наук.
- Редюк Алексей Александрович — научный сотрудник лаборатории нелинейной фотоники НГУ, кандидат физико-математических наук.

Информация по гранту

Работа выполнена в рамках гранта РНФ-17-72-30006, а также в рамках реализации государственного задания Минобрнауки России (проект № 1.6366.2017/БЧ).

Научное содержание работы

Постановка задачи

В рамках данной работы, мы пытаемся сделать первый шаг в поиске применения нелинейного преобразования Фурье в современных оптических линиях связи. Целью работы является применение нелинейного преобразования Фурье к стандартным оптическим сигналам, таких как OFDM и WDM, и изучение характеристик данных сигналов с точки зрения нелинейной парадигмы распространения сигнала. Также сигналы исследуются на предмет существования в них когерентных структур — солитонов, определяются критерии их существования и их влияние на распространение. Для исследования используются существующие численные алгоритмы нелинейного преобразования Фурье, а также их модификации.

Современное состояние проблемы

В последние годы были предприняты значительные усилия по уменьшению негативного воздействия нелинейности волокна с помощью различных методов компенсации [Cvijetic and Djordjevic(2013)]. Однако при развёртывании и использовании этих методов существуют многочисленные проблемы, поскольку большинство технологий, используемых для оптического волокна, изначально было разработано для линейных каналов. В рамках такой «линейной» идеологии нелинейность играет единственную роль искажения сигнала. Поиск оптимальной конструкции нелинейного канала передачи и способа использования нелинейности «конструктивным» образом имеет долгую историю. Интересный подход был предложен Hasegawa и Nyu [Hasegawa and Nyu(1993)], который выдвинул идею использования нелинейного спектра сигнала. Эта концепция известна как «eigenvalue communications», потому что информация была закодирована с использованием дискретных собственных значений, возникающих при разложении сигнала. Эта идея в последнее время вновь стала использоваться, как принципиально новая нелинейная коммуникационная техника, основанная на свойстве интегрируемости нелинейного канала и связанного с этим нелинейного преобразования Фурье [Zakharov and Shabat(1972)]. Основной целью этого предложения является практическая разработка парадигмы «интегрируемой оптической передачи» для сверхвысокоскоростных оптических систем связи на основе применения нелинейного преобразования Фурье (НПФ) для кодирования и обработки сигналов. Успешная реализация данных идей должна дать однозначный ответ на вопросы: «Каков истинный предел пропускной способности нелинейного волоконного канала?» и «Как мы можем достичь этого?». Это означает, что когда ограничения, связанные с «линейными методами», уменьшаются, мы ожидаем увеличения «продуктивности» волокна, при этом нелинейность работает как конструктивный элемент для повышения скорости передачи.

Описание работы

Метод нелинейного преобразования Фурье позволяет исследовать нелинейную составляющую сигналов, которые были разработаны в рамках линейной теории. Математический аппарат нелинейного преобразования Фурье позволяет лучше понять структуру сигналов, а также их особенности, связанные с нелинейными эффектами. В стандартных сигналах могут (при некотором уровне мощности) содержаться когерентные структуры — солитоны. Солитоны представляют интерес с прикладной точки зрения, поскольку содержат четыре варьируемых параметра, в которых может кодироваться информация.

Сам факт наличия солитонов в сигнале может быть обнаружен с помощью прямой задачи Захарова-Шабата. Спектр оператора L в задаче Захарова-Шабата, где функция $q(t, z)$ это исследуемый сигнал, может дать представление о структуре этого сигнала. Если в спектре существуют дискретные значения, то значит существуют и солитоны. Эта особенность будет использоваться для дальнейшего анализа стандартных оптических сигналов. Для анализа сигналов используются численные алгоритмы, предварительно проверенные на тестовых сигналах: прямоугольном и сигнале Satsuma-Yajima.

Параметры сигнала, при которых могут существовать солитоны, зависят от системы. Для последующего исследования мы рассматриваем два параметра, присущих каждому сигналу. Ими являются L_1 и L_2 нормы, рассчитываемые следующим образом:

$$L_1(q) = \|q(t, z)\|_{L_1} = \int_{-\infty}^{+\infty} |q(t, z)| dt, \quad (1)$$

$$L_2(q) = \|q(t, z)\|_{L_2} = \int_{-\infty}^{+\infty} |q(t, z)|^2 dt, \quad (2)$$

где $q(t, z)$ — исследуемый сигнал, t и z — временная и пространственная координаты.

Для исследования были выбраны два стандартных способа мультиплексирования телекоммуникационных сигналов: мультиплексирование с частотным разделением каналов (OFDM — orthogonal frequency-division multiplexing) и мультиплексирование с разделением по длине волны (WDM — wavelength-division multiplexing). Без ограничения общности, мы фокусируемся на двух модуляционных форматах: фазовая манипуляция (PSK — phase-shift keying) и квадратурная амплитудная модуляция (QAM — quadrature amplitude modulation).

Ранее такие типы сигналов не исследовались на предмет содержания солитонов, поэтому на первом этапе мы изучали только факт существования солитонов, а не их число и характеристики. Важно отметить, что в данной части работы нас интересует сам факт наличия солитонов в сигнале, а не их количество, поэтому вероятность существования дискретного спектра вычисляется как отношение числа сигналов, в которых присутствует хотя бы один солитон, к общему числу исследуемых сигналов с заданными параметрами.

Полученные результаты

Далее мы набирали статистику из 200 сигналов с случайными входными данными при фиксированных параметрах для каждой точки на графиках. На Рисунке 1 показано как

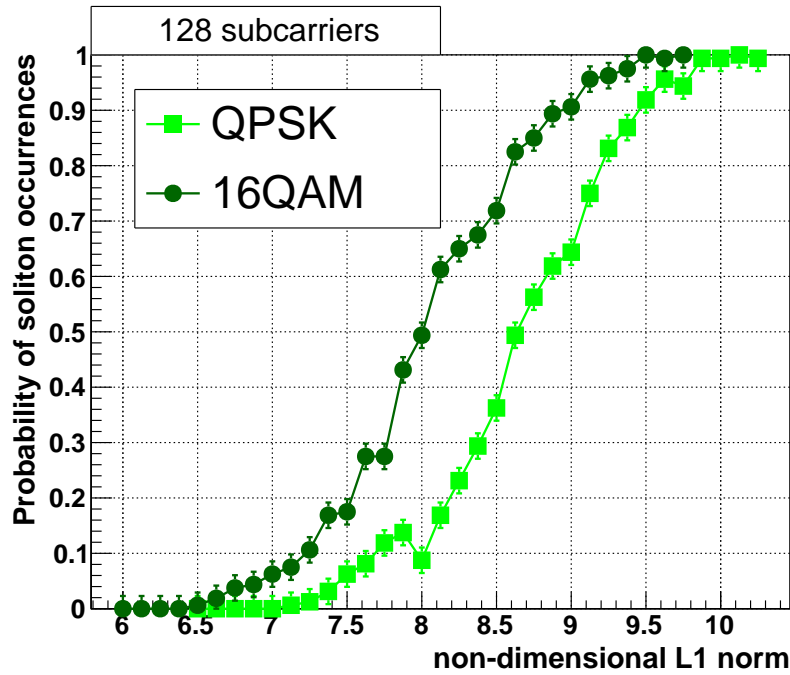


Рис. 1: Зависимость вероятности содержания солитонов в OFDM сигналах с 128 поднесущими и QPSK и 16-QAM модуляцией.

изменяется вероятность содержания солитона в сигнале в зависимости от L_1 нормы для сигнала с 128 поднесущими и QPSK и 16-QAM модуляцией.

На Рисунке 2 (а) представлены результаты зависимости вероятности существования солитонов в OFDM сигналах с 16-QAM от средней мощности сигнала. При увеличении количества поднесущих необходимая для существования солитонов мощность увеличивается. Этот эффект может найти объяснение в Рисунке 2 (б), который показывает аналогичный график с учетом того, что средняя мощность делится на каждый "канал", под которым понимается соответствующая поднесущая. На графике видно, что в действительности вероятность существования определяется удельной мощностью каждого канала, которая не зависит от общего числа поднесущих. Как следствие, при увеличении числа поднесущих возрастает и общая мощность сигнала, необходимая для существования солитонов. Аналогичный эффект наблюдается и для других типов модуляции (Рис. 3). Из полученных результатов можно сделать вывод, что полоса средней мощности на один канал находится в промежутке от -42 дБм до -37 дБм. Исходя из этих данных, мы можем предсказывать границы существования солитонов для других сигналов.

Однако, тип модуляции также влияет на распределение вероятности. Рисунок 4 демонстрирует, что при увеличении порядка констелляционной диаграммы, а значит и при увеличении количества бит информации, закодированной в одном символе, необходимая средняя мощность сигнала для существования солитонов уменьшается. Этот факт хорошо заметен при сравнении QPSK и других типов модуляции. Независимо от количества поднесущих наблюдается тенденция, что для QPSK модуляции средняя мощность сигнала выше, чем для других. Если мы перейдем к зависимости от средней мощности на один канал, то ситуация не изменится (Рис. 5).

На этом этапе работы мы исследовали WDM символы с QPSK, 16-, 64-, 1024-QAM и

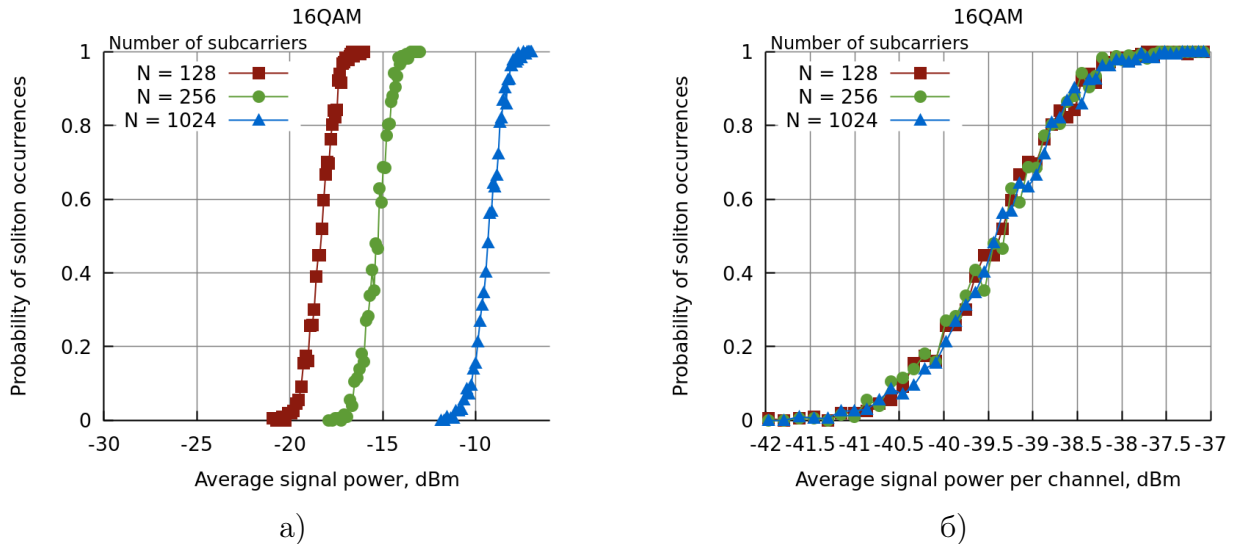


Рис. 2: Зависимость вероятности существования солитонов для OFDM сигналов с 16-QAM и длительностью символа 10 нс от (а) средней мощности сигнала, (б) средней мощности сигнала на один канал.

варьировали количество каналов от 9 до 51. Аналогично OFDM сигналам, мы набрали статистику из 200 WDM символов для каждого набора параметров. Зависимость вероятности существования солитонов в сигнале от средней мощности сигнала на один канал для разных типов модуляции и разного количества каналов представлена на Рис. 6. Хочу подчеркнуть, что в отличие от OFDM сигнала, на графиках представлена средняя мощность, приходящаяся на один WDM канал.

Сравнивая график на Рис. 6 (а) с другими, можно отметить, что для QPSK модуляции уровень мощности намного выше, чем для других типов модуляции, и находится в узком промежутке от 5.8 дБм до 7 дБм. Для 16-, 64-, 1024-QAM полоса составляет от 2 дБм до 6 дБм. При увеличении количества каналов пороговая мощность снижается, а разница мощностей для разного числа каналов сохраняется для всех типов модуляции. Для WDM сигнала мы наблюдаем такой же эффект, как и для OFDM сигналов: при увеличении порядка модуляции пороговая мощность уменьшается (Рис. 7). Помимо этого, WDM сигналы с QPSK модуляцией имеют пороговую мощность существования солитонов намного больше, чем с другими типами модуляции. Также, для WDM сигналов разница между 16-, 64- и 1024-QAM модуляциями существенней, чем в OFDM сигналах. Например, при увеличении количества каналов мы можем разделить 16-QAM и 64-QAM для 51 канала (Рис. 7 (г)).

Эти особенности демонстрируют, что, несмотря на схожие процессы формирования сигналов, WDM и OFDM системы имеют разную внутреннюю структуру, а также по-разному зависят от выбранных параметров.

Эффект от использования кластера в достижении целей работы

С помощью ресурсов ИВЦ НГУ мы произвели набор статистики для разных типов и параметров оптических сигналов. В результате мы получили графики, представленные

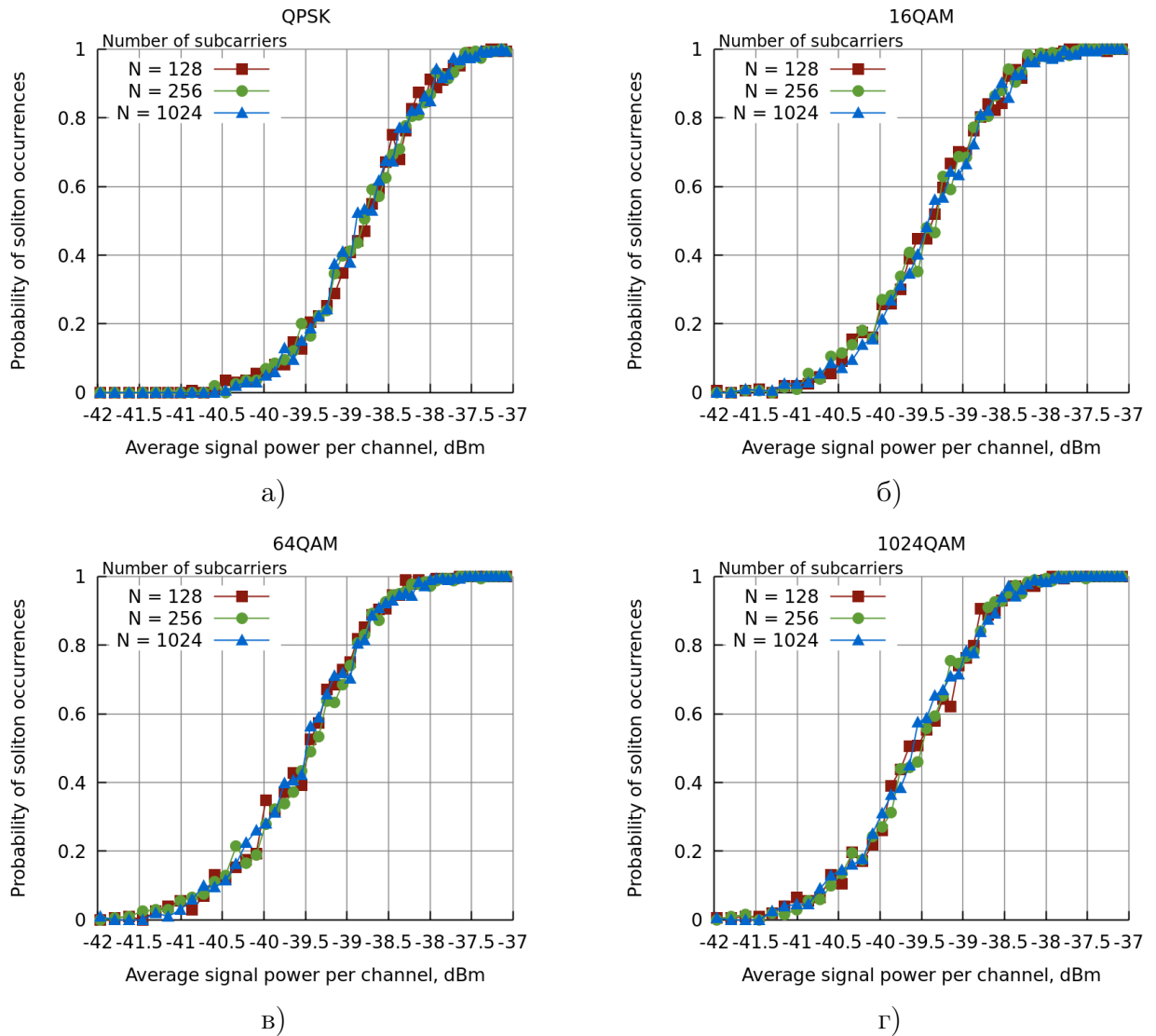


Рис. 3: Зависимость вероятности существования солитонов в OFDM символе с длительностью 10 нс и (а) QPSK, (б) 16-QAM, (в) 64-QAM, (г) 1024-QAM модуляцией от средней мощности сигнала на один канал.

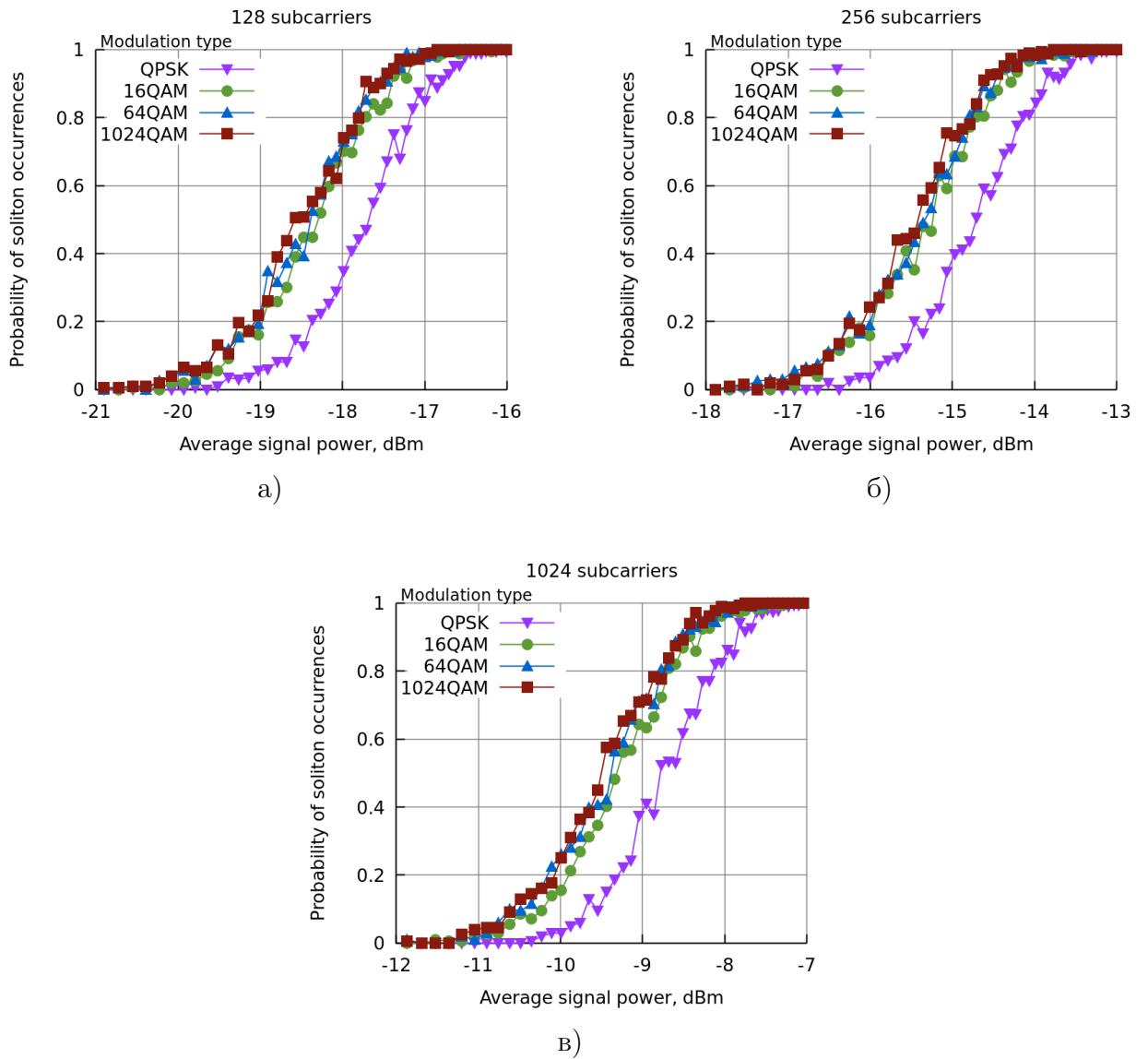


Рис. 4: Зависимость вероятности существования солитонов в OFDM символе с длительностью 10 нс и (а) 128, (б) 256, (в) 1024 поднесущими от средней мощности сигнала.

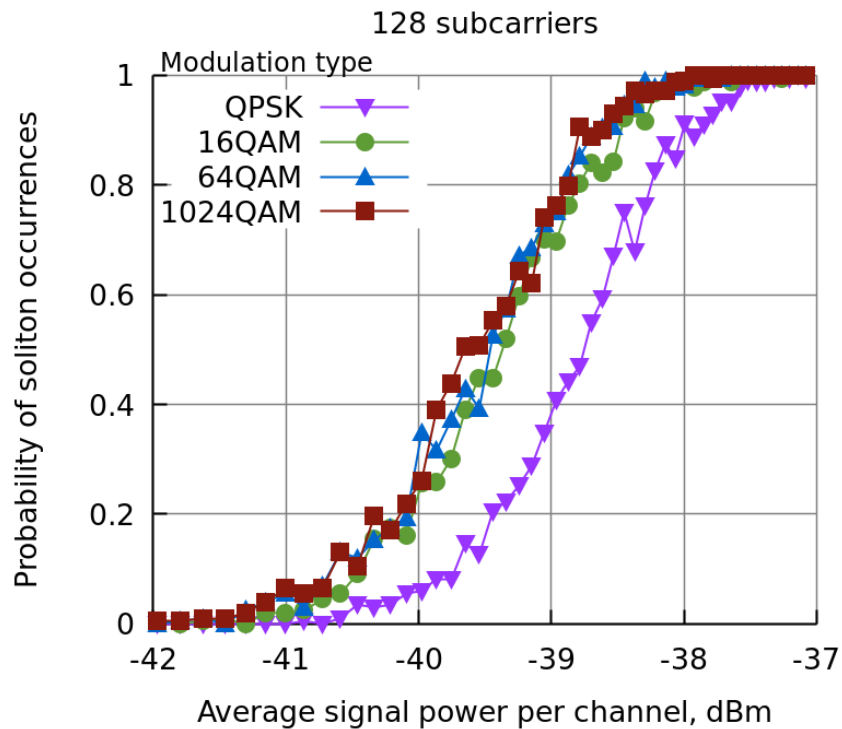
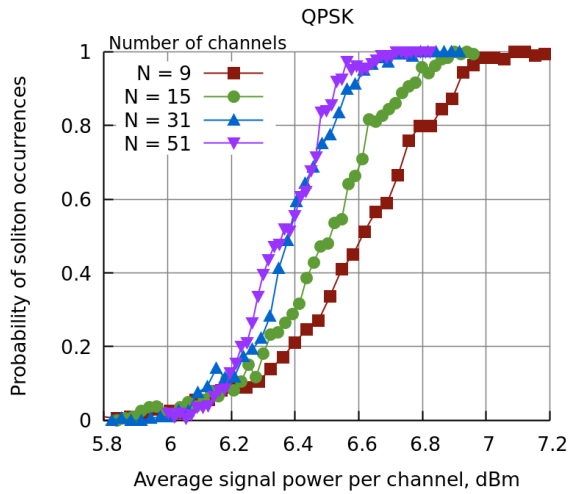


Рис. 5: Зависимость вероятности существования солитонов в OFDM символе с длительностью 10 нс и 128 поднесущими от средней мощности сигнала на один канал.

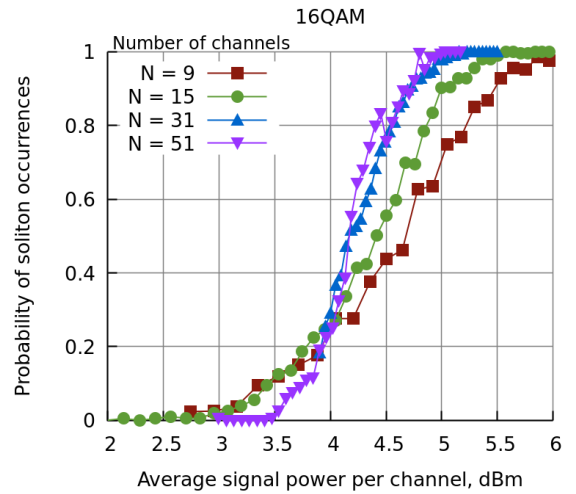
выше.

Перечень публикаций, содержащих результаты работы

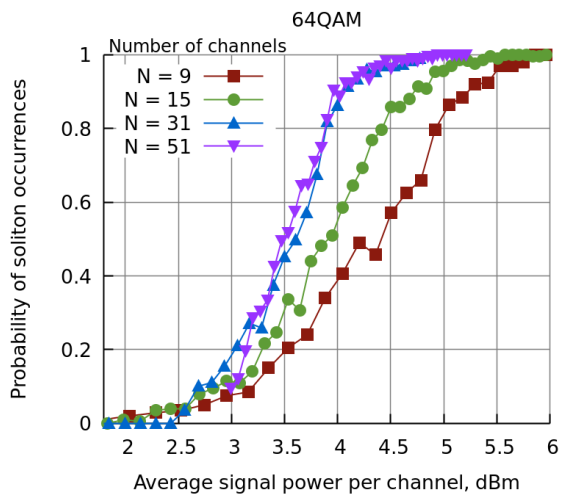
1. Седов Е. В. Генерация когерентных структур из шума // Фотоника и квантовые оптические технологии : Материалы 55-й Междунар. науч. студ. конф. 17 – 20 апреля 2017 г. / Новосиб. гос. ун-т. - Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2017. Стр. 30.
2. Egor V. Sedov, Alexey A. Redyuk, Mikhail P. Fedoruk, Andrey A. Gelash, Leonid L. Frumin, and Sergey K. Turitsyn, "Soliton content in the standard optical OFDM signal," *Opt. Lett.* 43, 5985-5988 (2018)
3. Седов Е. В. Содержание солитонов в стандартных оптических OFDM сигналах // Фотоника и квантовые оптические технологии : Материалы 57-й Междунар. науч. студ. конф. 14 – 19 апреля 2019 г. / Новосиб. гос. ун-т. - Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2019. Стр. 23.



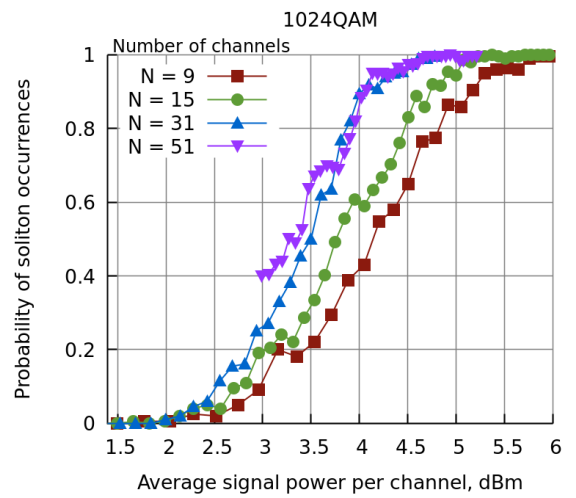
a)



б)



в)



г)

Рис. 6: Зависимость вероятности существования солитонов в WDM сигнале от средней мощности сигнала на один канал с длительностью 100 пс и (а) QPSK, (б) 16-QAM, (в) 64-QAM, (г) 1024-QAM модуляцией.

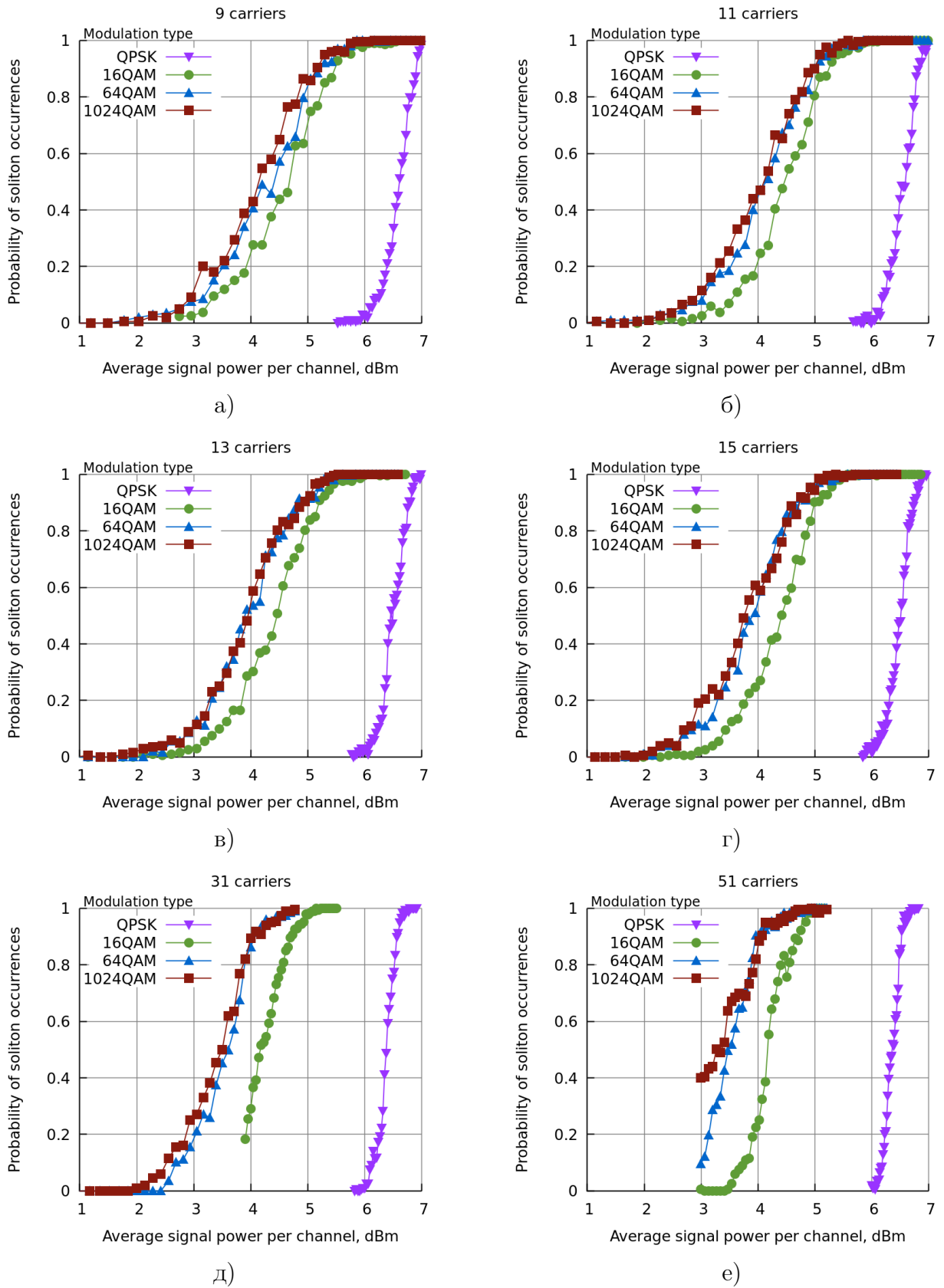


Рис. 7: Зависимость вероятности содержания солитонов в WDM сигнале с (а) 9, (б) 11, (в) 13, (г) 15, (д) 31 и (е) 51 каналами.

Список литературы

- [Cvijetic and Djordjevic(2013)] M. Cvijetic and I. Djordjevic. *Advanced Optical Communication Systems and Networks*. Artech House applied photonics series. Artech House, 2013. ISBN 9781608075553.
- [Hasegawa and Nyu(1993)] A. Hasegawa and T. Nyu. Eigenvalue communication. *Journal of Lightwave Technology*, 11(3):395–399, 1993.
- [Zakharov and Shabat(1972)] V. E. Zakharov and A. B. Shabat. Exact theory of two-dimensional self-focusing and one-dimensional self-modulation of waves in nonlinear media. *Soviet Physics JETP*, 34(1):62, 1972.