

Применение нелинейного преобразования Фурье в оптических телекоммуникациях

И.С. Чеховской*, Е.В. Седов, С.К. Турицын, М.П. Федорук

¹ Новосибирский Государственный Университет, г. Новосибирск, Россия

² Университет Астона, г. Бирмингем, Великобритания

*E-mail: i.s.chekhovskoy@nsu.ru

DOI: 10.31868/RFL.2024.101-102

Нелинейное уравнение Шрёдингера (НУШ) — одна из ключевых моделей, имеющая большое значение в различных областях физики и в практических инженерных приложениях. В частности, оно широко используется в волоконно-оптических линиях связи для учета влияния дисперсионных и нелинейных эффектов, действующих на оптические сигналы при распространении вдоль оптического волокна. НУШ принадлежит к классу так называемых интегрируемых нелинейных уравнений в частных производных, которые можно проинтегрировать с помощью метода обратного преобразования рассеяния (МОЗР), разработанного для этого уравнения Захаровым и Шабатом [1], также известного как нелинейное преобразование Фурье (nonlinear Fourier transform – NFT). NFT позволяет представить оптический сигнал через его нелинейный спектр, который определяется решениями спектральной задачи Захарова-Шабата (ЗШШ):

$$\begin{cases} -\partial_t \psi_1 + q_0(t) \psi_2 = i\zeta \psi_1, \\ \partial_t \psi_2 + q_0^*(t) \psi_1 = i\zeta \psi_2. \end{cases}$$

Здесь $q_0(t)$ играет роль начального сигнала с затухающими граничными условиями, который, например, может задаваться на передатчике в начале оптической линии связи, а $\zeta = \xi + i\eta$ представляет собой комплексный спектральный параметр, являющийся аналогом стандартной частоты при вычислении «линейного» преобразования Фурье. Данный параметр определяет нелинейный спектр, который состоит из двух частей: дискретной, описывающей вклад солитонов в сигнал, а также непрерывной, связанной с вкладом дисперсионных волн. Непрерывный спектр эволюционирует тривиальным образом, что позволяет за линейное количество операций найти его значение на любой длине распространения вдоль волокна, после чего с помощью обратного NFT восстановить оптическое поле.

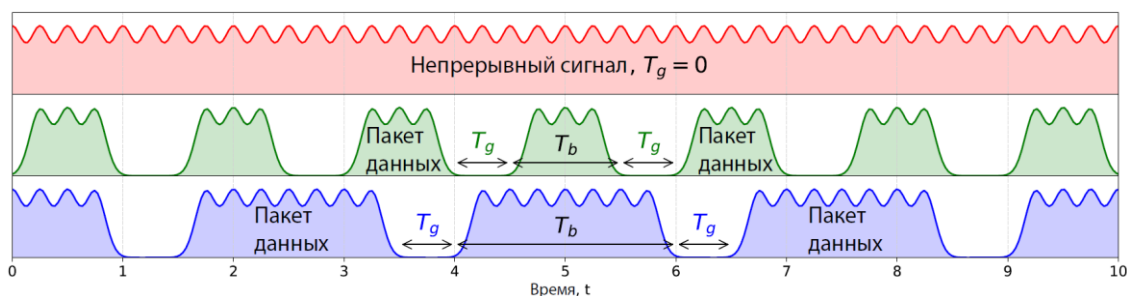


Рис. 1. Схематическое изображение режима пакетной передачи данных с различными соотношениями T_g/T_b , где T_g – количество символов в защитном интервале, а T_b – в отдельном пакете данных. Первая строка иллюстрирует непрерывный сигнал без защитного интервала. ($T_g = 0$), во второй строке показан режим с защитным интервалом, равным половине длины пакета ($T_g = 0.5T_b$), а на третьей строке изображен режим, когда защитный интервал составляет одну четвертую длины пакета ($T_g = 0.25T_b$).

К настоящему времени предложено несколько вариантов применения NFT в линиях связи. В данной работе мы проанализировали границы применимости одного из них, основанного на передаче сигналов в пакетном режиме, когда отдельные пакеты отделяются друг от друга защитными интервалами для учета дисперсионного расплывания («burst»-режим) (Рис. 1). В таком подходе NFT используется на стороне приемника: принятый сигнал разделяется на отдельные пакеты, к каждому из которых применяется прямое NFT. После чего «отматывается» эволюция сигнала на длину линии связи и с помощью обратного NFT восстанавливается изначальный сигнал. Без ограничения общности в этой работе был рассмотрен формат квадратурной амплитудной модуляции (16-QAM), который использует как амплитуду, так и фазу оптического сигнала. Поскольку NFT не применим для НУШ, учитывающего потери в линии связи, использовалась усредненная по потерям модель на основе НУШ. Моделировалась линия связи длиной 960 км, состоящая из 12 пролетов по 80 км. Для учета дисперсионного расплывания добавлялись защитные интервалы длиной 297 символов.

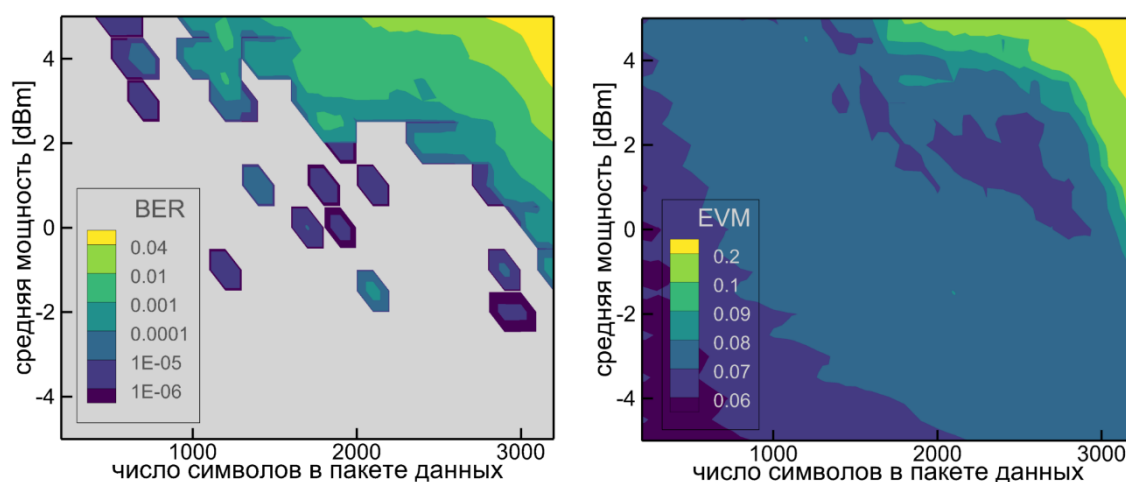


Рис. 1. Зависимость BER и EVM от числа символов в пакете данных T_b и от средней мощности сигнала. Уровень BER=0.04 соответствует уровню hard decision для FEC. Серым цветом обозначена область, где BER=0.

Нами было проанализировано качество восстановления сигнала в зависимости от числа символов в отдельном пакете данных T_b , а также от средней мощности сигнала. В результате было показано, что в режимах передачи с большой нелинейностью (и, соответственно, с дискретным спектром большого размера), оказывается возможным успешно восстанавливать сигнал с помощью NFT при размере пакета данных вплоть до 3000 символов (Рис. 2), когда частота битовых ошибок (bit error rate – BER) достигает уровня 0.04 (hard decision уровень для Forward Error Correction – FEC). С ростом средней мощности уменьшается длительность сигналов, которые можно восстанавливать. При этом BER для сигналов с малой мощностью (до 2 dBm) близок к нулю (серая область на Рис. 2).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-11-20040, <https://rscf.ru/project/20-11-20040/> (Ч.И.С. – численные исследования, Ф.М.П. – постановка задачи).

Литература

- [1] Zakharov V. E. and Shabat A. B., Soviet Physics JETP, **34**, 62 (1972)
- [2] Turitsyn S. K., et al, Optica, **4**, 307–322 (2017)