

Алгоритмы компенсации нелинейных искажений сигнала для экспериментальной 600-км DP-QPSK оптической линии связи

А.А. Редюк^{1,*}, Е.И. Шевелев¹, В.Р. Данилко¹, О.С. Сидельников¹, М.П. Федорук¹,
Т.О. Базаров², М.А. Сенько^{2,4}, Л.А. Самоделкин^{3,4}, Д.Д. Старых³

¹ Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск

² ООО «Т8», г. Москва

³ ООО «Т8 НТЦ», г. Москва

⁴ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва

* E-mail: a.redyuk@nsu.ru

DOI:10.31868/RFL.2024.103-104

Нелинейные искажения сигнала являются одной из основных причин, ограничивающих пропускную способность и протяжённость современных волоконно-оптических линий связи [1]. Существует ряд методов компенсации нелинейных искажений, но для практического применения алгоритмы должны быть одновременно точными, быстрыми и устойчивыми к различным помехам. Один из подходов основывается на применении методов теории возмущений к нелинейному уравнению Шрёдингера и позволяет установить следующее соотношение [2]:

$$a_k \approx c_0 b_k + \sum_{m,n=-M}^M c_{m,n} b_{k+m} b_{k+n} b_{k+m+n}^* + c_b$$

где a_k – символы на передатчике, b_k – символы после компенсации всех линейных эффектов на приёмнике, M – параметр памяти канала, c_0 , c_b , $c_{m,n}$ – комплексные коэффициенты возмущений. Данное соотношение может быть основой алгоритма для компенсации нелинейных искажений: имея коэффициенты возмущений и принимая на приёмнике поток символов b_k , можно приближённо восстанавливать символы a_k с передатчика. Для нахождения коэффициентов возмущения можно использовать градиентные методы, которые минимизируют среднеквадратичное отклонение между символами a_k и символами после компенсации нелинейности.

На рисунке 1 представлена схема экспериментальной линии связи, которая использовалась для тестирования описанного подхода. Линия состоит из передатчика, 6 пролётов стандартного одномодового волокна по 100 км каждый, эрбиевых оптических усилителей, приёмника сигнала. На передатчике генерируются случайные QPSK символы, которые используются для формирования последовательности импульсов с формой типа корень из приподнятого косинуса с коэффициентом сглаживания 0,1 и символьной скоростью 31,6 ГБод, что соответствует битовой скорости передачи 126 Гбит/с в двух поляризациях. Исследуется распространение одного спектрального канала.

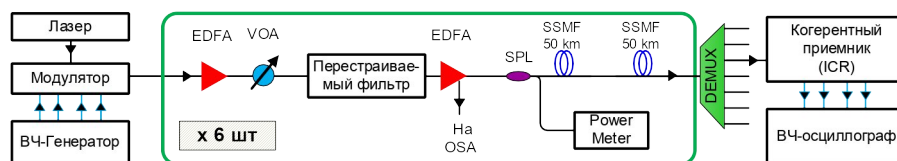


Рис. 1. Схема экспериментальной установки линии связи.

Размер уникального кадра для формирования записи составляет 178176 случайных символов при 133 повторяющихся кадрах. Таким образом, общая длина записи составляет 23697408 символов. При выполнении экспериментов для

первых 5 пролётов мощность сигнала на входе в пролёт устанавливалась на уровне 0 дБм, что гарантировало линейный режим передачи и накопление дисперсии по аналогии с протяжёнными линиями связи без промежуточной компенсации дисперсии. Мощность перед 6 пролётом принимала значения 0, 9, 12 и 13 дБм для накопления нелинейных искажений.

На экспериментальных данных была исследована зависимость эффективности компенсации нелинейных искажений с помощью предложенной схемы от её вычислительной сложности, выраженной в количестве требуемых коэффициентов возмущения. В роли меры эффективности использовался выигрыш по параметру сигнал-шум $\Delta SNR = SNR_{PBM} - SNR_{CDC}$, где SNR_{CDC} и SNR_{PBM} – параметр до и после применения алгоритма компенсации искажений. Коэффициенты возмущения C_0 , C_b , $C_{m,n}$ находились путём решения задачи линейной регрессии методом наименьших квадратов, используя тренировочный набор символов.

На рисунке 2 слева показана зависимость ΔSNR от количества используемых коэффициентов. Синим цветом отмечены результаты, соответствующие обучению коэффициентов по известным идеальным символам a_k с передатчика. Как видно, при увеличении количества коэффициентов удаётся достигнуть выигрыша вплоть до 1,4 дБ с последующим выходом на плато. Также были исследованы возможности схемы при обучении коэффициентов возмущения по символам, полученным после детектирования символов b_k по жёсткому решению. Данная последовательность содержит порядка 2% некорректных символов по сравнению с a_k . Такой подход показал выигрыш 1,2 дБ, что соответствует 0,2 дБ деградации по сравнению с обучением по идеальным символам. Однако мы показали, что если сделать ещё одну итерацию схемы, используя для обучения коэффициентов последовательность после детектирования восстановленных символов по жёсткому решению, то можно вплотную приблизиться к случаю обучения по символам a_k .

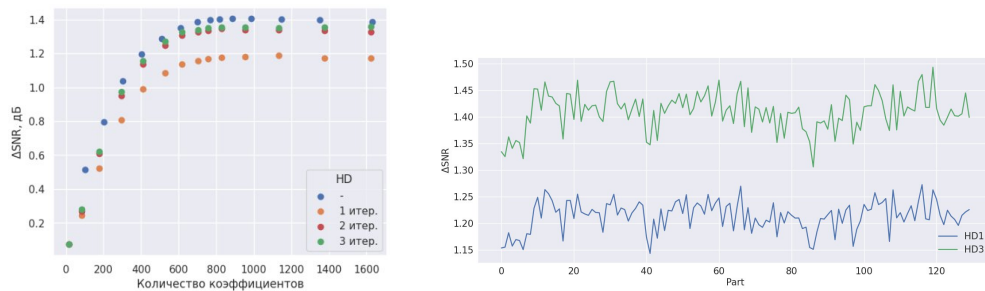


Рис. 2. Зависимость выигрыша по параметру сигнал-шум от количества использованных коэффициентов (слева) и номера кадра в записи (справа).

Исследована эффективность компенсации искажений в рамках одной записи, когда для обучения коэффициентов возмущения использовался один кадр из записи, а тестирование выполнялось на остальных 132 кадрах. На рисунке 2 справа показана зависимость ΔSNR от номера кадра в случае одной итерации и трёх итераций с использованием символов после детектирования с жёстким решением. Видно, что выигрыш по SNR колеблется около среднего значения, близкого к ΔSNR , на кадре, на котором происходило обучение.

Литература

- [1] Winzer P. J., Neilson D. T., and Chraplyvy A. R., *Opt. Express* **26**, 24190 (2018).
- [2] Redyuk A., Averyanov E. et al, *J. Lightwave Technology*, **38**, 1250-1257 (2020).