

Теория возмущений и многопараметрическая оптимизация для компенсации нелинейных искажений сигнала в оптических системах связи

Е.И. Шевелев*, А.А. Редюк, В.Р. Данилко, М.П. Федорук

Новосибирский государственный университет

*E-mail: e.shevelev@g.nsu.ru

DOI:10.31868/RFL.2024.105-106

Нелинейные искажения сигнала являются одной из основных причин, ограничивающих пропускную способность и протяжённость современных волоконно-оптических линий связи [1]. В настоящее время существует ряд подходов по компенсации нелинейных искажений [2-4], однако для практического использования алгоритмы должны быть одновременно достаточно точными, быстрыми и устойчивыми к различным помехам.

Один из разработанных подходов основан на том, что если распространение оптических импульсов по волоконно-оптической линии связи можно описать нелинейным уравнением Шрёдингера:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = \left[-\frac{\alpha}{2} - i\frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} + i\gamma |A|^2 \right] A,$$

где α, β_2, γ – затухание, дисперсия и нелинейность волокна, $A(z, t)$ – медленно меняющаяся огибающая оптического сигнала с начальными условиями вида $A(0, t) = \sum_k a_k f(t - kT)$, $f(t)$ – профиль несущего импульса, T – длительность символического интервала, a_k – комплексные символы из используемого алфавита, то, рассматривая нелинейность как малый параметр и применяя теорию возмущений, можно получить следующее соотношение, связывающее символы a_k на передатчике и символы b_k после компенсации всех линейных эффектов на приёмнике:

$$a_k \approx C_0 b_k + \sum_{m,n=-M}^M C_{m,n} b_{k+m} b_{k+n} b_{k+m+n}^* + C_b,$$

где M – параметр памяти канала, $C_0, C_b, C_{m,n}$ – комплексные коэффициенты возмущений, b^* означает комплексное сопряжение b [5].

В подавляющем большинстве работ для нахождения коэффициентов возмущения используются градиентные методы, минимизирующие среднеквадратичное отклонение (MSE) между символами [6]. Однако основными параметрами, характеризующими качество передачи информации, являются коэффициент битовых ошибок BER и отношение сигнал-шум. Мы предлагаем модификацию этого подхода в виде двухэтапной схемы вычисления коэффициентов возмущения. На первом этапе коэффициенты вычисляются методом наименьших квадратов (МНК) путём минимизации среднеквадратичного отклонения, а на втором этапе найденное решение используется в качестве начального приближения для минимизации коэффициента битовых ошибок с помощью метода роя частиц (МРЧ).

Для тестирования предложенного подхода в численных экспериментах использовалась смоделированная линия связи протяжённостью 2000 км с модуляцией сигнала 16QAM, ее параметры представлены в таблице 1. С помощью

алгоритма компенсации искажений принятого сигнала на основе предложенной схемы удалось получить 0,9 дБ выигрыша по параметру сигнал-шум.

Таблица 1. Параметры модели линии связи

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Затухание, α	0,2 дБ/км	Длина волны	1550 нм
Дисперсия, β_2	-21,7 пс ² /км	Коэфф. сглаж. RRC	0,1
Нелинейность, γ	1,4 Вт ⁻¹ км ⁻¹	Бодовая скорость	66,7 Гбод
Длина, L	20×100 км	Согласованный фильтр	66,7 ГГц
Шум-фактор, NF	4,5 дБ	Битовая скорость*	267 Гбит/с

*включая затраты на FEC

На рисунке 1 приведены сигнальные созвездия до компенсации нелинейных искажений и после применения алгоритма компенсации с коэффициентами, вычисленными методом МНК и МРЧ, а также соответствующие значения метрик MSE и BER. После применения МНК (см. Рис 1б), можно заметить, что сигнальное созвездие становится более гладким и компактным, а символьные кластеры лучше отделяются друг от друга. Вместе с тем также становится заметным, что распределение каждого кластера, особенно крайних с наибольшей амплитудой, растягивается и отклоняется от нормального распределения. Однако после корректировки коэффициентов с использованием МРЧ (см. Рис 1в), можно заметить, что распределения снова приближаются к нормальным, а коэффициент битовых ошибок BER дополнительно уменьшается.

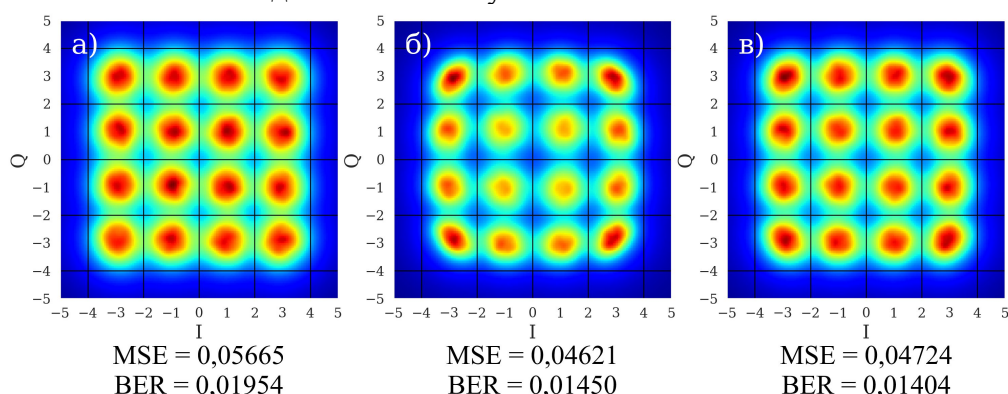


Рис. 1. Сигнальные созвездия до компенсации нелинейных искажений (а), после применения модели с коэффициентами возмущения, вычисленными на основе МНК (б), после применения модели с коэффициентами возмущения, скорректированными с помощью МРЧ (в)

В работе мы показываем улучшение точности алгоритма по сравнению с одноэтапной схемой, демонстрируем оценки вычислительной сложности алгоритма и соотношение между его сложностью и точностью.

Исследование выполнено за счет средств гранта, предоставленного Новосибирскому государственному университету для реализации программы стратегического академического лидерства “Приоритет-2030”. Работа М.П. Федорука выполнена за счет Российского научного фонда (грант № 20-11-20040, <https://rscf.ru/project/20-11-20040>).

Литература

- [1] P.J Winzer, D.T. Neilson, A.R. Chraplyvy, *Opt. Express*, **26**, 24190-24239 (2018)
- [2] E. Ip, *J. Lightwave Technology*, **28**, 939-951 (2010)
- [3] O. Sidelnikov, A. Redyuk et al, *J. Lightwave Technology*, **39**, 2397-2406 (2021)
- [4] F.N. Khan, Q. Fan et al, *J. Lightwave Technology*, **37**, 493-516 (2019)
- [5] A. Redyuk, E. Averyanov et al, *J. Lightwave Technology*, **38**, 1250-1257 (2020)
- [6] P.J. Freire, A. Napoli et al, *Selected Topics in Quantum Electronics*, **28**, 1-23 (2022)