

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ СВЯЗИ

Подавление нелинейного шума в высокоскоростном оптическом канале с фазовой модуляцией и компенсацией дисперсии

Е.Г.Шапиро, Д.А.Шапиро

Выполнено численное моделирование распространения оптических импульсов с четырехуровневой фазовой модуляцией и мультиплексированием по поляризациям со скоростью 40 Гбод на дистанцию 2000 км. Показано, что использование канала с большой отрицательной дисперсией и предварительным большим положительным chirпированием импульсов значительно уменьшает нелинейное искажение и улучшает качество сигнала. Для дальнейшего уменьшения вероятности ошибки распознавания предложено вместо волокна с отрицательной дисперсией использовать компенсаторы с малым затуханием.

Ключевые слова: волоконно-оптические линии связи, математическое моделирование, нелинейное уравнение Шрёдингера, хроматическая дисперсия.

1. Введение

В настоящее время в оптических линиях связи наблюдается ежегодный быстрый рост трафика. Ожидается, что в ближайшие годы существующие линии перестанут справляться с объемом передаваемых данных [1], поэтому на первый план выдвигается задача увеличения пропускной способности линии. Для ее решения используется когерентное детектирование, многоканальная передача, новые форматы модуляции [2], мультиплексирование по поляризациям, высокая скорость в канале и др. Усиление сигнала, оптимизация дисперсионных карт также способны увеличить информационную емкость оптических линий, поэтому эти направления исследований также являются актуальными.

Для когерентных линий связи с электронной компенсацией дисперсии [3] существенными факторами являются накопленная дисперсия и скорость передачи данных, ограниченные возможностями процессоров цифровой обработки сигнала [4]. С этой точки зрения для протяженных линий с большой символьной скоростью (40 Гбод) перспективно использовать четырехуровневый фазовый формат модуляции с мультиплексированием по поляризации (DP QPSK) [5].

Искажения сигнала связаны в основном с шумами усилителей и нелинейными эффектами. Режим точки сжатия импульсов, скользящей вдоль периодической секции линии связи, рассмотрен в работе [6] для двоичного формата передачи ООК. Для четырехуровневого фазового формата использование только большой отрицательной дисперсии лишь незначительно повышает качество сиг-

нала, поэтому дополнительно требуется положительное chirпирование входных импульсов. Последнее вызывает быстрое уширение импульсов, что уменьшает деградацию сигнала, обусловленную керровской нелинейностью. Комбинация этих двух способов подавления нелинейного искажения сигнала была предложена для многоуровневого амплитудного формата [7]. Показано, что они уменьшают нелинейные искажения амплитуды. Однако амплитудная и фазовая модуляции принципиально различаются; в частности, при QPSK-формате сигнала в идеальной оптической системе амплитуды передаваемых символов одинаковы. Поэтому вопрос о возможности подавления нелинейных фазовых шумов при распространении QPSK-сигнала остается открытым.

Цель настоящей работы – проверка предложенных способов подавления искажений для QPSK-формата. Более того, в работе рассмотрено распространение оптических импульсов моделировалось с помощью связанных уравнений Шрёдингера для поляризаций, т.е. в DP-QPSK формате, в отличие от модели [7], где не учитывалось взаимодействие поляризаций. Модель связанных уравнений Шрёдингера для ортогональных поляризаций была проверена в работе [4], в которой получено хорошее согласие результатов численного расчета и лабораторного эксперимента для линии длиной 1200 км. Мы численно моделировали одноканальное распространение гауссовых оптических импульсов с битовым интервалом 25 пс в рамках связанных нелинейных уравнений Шрёдингера [4, 8].

2. Численное моделирование

Линия связи содержала 20 периодических секций, состоящих из следующих элементов:

$$\text{SMF (100 км)} + \text{EDFA} + \text{DCF} + \text{EDFA},$$

где SMF – стандартное одномодовое волокно; EDFA – волоконные эрбиевые усилители (коэффициент шума 4.5 дБ); DCF – компенсирующее дисперсию волокно.

Е.Г.Шапиро, Д.А.Шапиро. Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1; Новосибирский государственный университет, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Пирогова, 2; e-mail: shapiro@iae.nsk.su

Для описания шума усиленного спонтанного излучения (ASE) точечных эрбиевых усилителей использовалась модель белого гауссова шума [4]. Искажения, вызванные поляризационной модовой дисперсией, в настоящей ра-

	SMF	DCF
Затухание на $\lambda = 1550$ нм (дБ/км)	0.2	0.65
Эффективная площадь (мкм ²)	80	19
Хроматическая дисперсия (пс·нм ⁻¹ ·км ⁻¹)	17	-100
Дисперсионный наклон (пс·нм ⁻² ·км ⁻¹)	0.07	-0.41
Показатель преломления (10^{-20} м ² ·Вт ⁻¹)	2.7	2.7

боте не учитывались. Технические характеристики волокон SMF и DCF приведены ниже.

Средняя дисперсия линии связи зависит от длины DCF-участка. Накопленная дисперсия компенсировалась на приемном устройстве. Нами рассмотрена передача информации, которая кодируется четырьмя фазовыми уровнями гауссовых импульсов с амплитудами A_x и A_y , поляризованными по осям x и y соответственно.

Сигнал задавался в виде

$$A_x(t) = \sum_n a_{x_n}(t - nT), A_y(t) = \sum_n a_{y_n}(t - nT),$$

$$a_{x_n}(\tau) = B\xi_{x_n} \exp[-(\tau^2 - 2iC\tau^2)/(2T_0^2)],$$

$$a_{y_n}(\tau) = B\xi_{y_n} \exp[-(\tau^2 - 2iC\tau^2)/(2T_0^2)],$$

где ξ_{x_n} и ξ_{y_n} – независимые случайные величины, принимающие с вероятностью 1/4 одно из значений множества $\{\exp(i\pi/4), \exp(-i\pi/4), \exp(3i\pi/4), \exp(-3i\pi/4)\}$; $T = 25$ пс – битовый интервал; $T_0 = 5$ пс – параметр ширины импульса; C – параметр чирпа. Таким образом, ширина импульса на полувысоте составляла примерно 0.47 битового интервала. В численном счете $B = 0.075$ Вт^{1/2}, что соответствует средней мощности импульса 2 мВт.

Для подавления нелинейного искажения фазы мы использовали:

- 1) большую отрицательную дисперсию линии связи;
- 2) большое положительное чирпирование.

Ниже приведены сигнальные диаграммы битовых последовательностей на приемном устройстве в случае использования указанных способов подавления нелинейности и без них. Импульсы усреднялись по битовому интервалу, объем выборки составил 10200 значений.

На рис.1 приведена сигнальная (конstellационная) диаграмма A_x в случае нулевой средней дисперсии линии связи и без чирпирования импульсов.

Сигнальная диаграмма для поляризации A_y по оси y имеет схожий вид. Отметим, что точки, соответствующие разным битовым последовательностям, перемешаны, и сигнал невозможно корректно распознать. Вероятность ошибки BER составляет 0.23.

Применение большого положительного чирпирования улучшает качество сигнала. Это следует из рис.2, где приведена диаграмма A_y для чирпированного сигнала. Видно, что облако точек распадается на четыре области, соответствующие четырем уровням фазовой модуляции, и эти области, в отличие от рис.1, различимы. Вероятность ошибки BER в данном случае равна 4×10^{-2} .

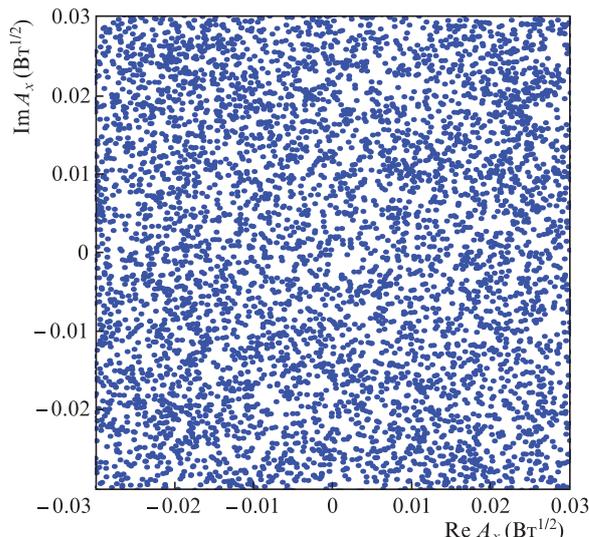


Рис.1. Сигнальная диаграмма для поляризации A_x , $\langle D \rangle = 0$, $C = 0$.

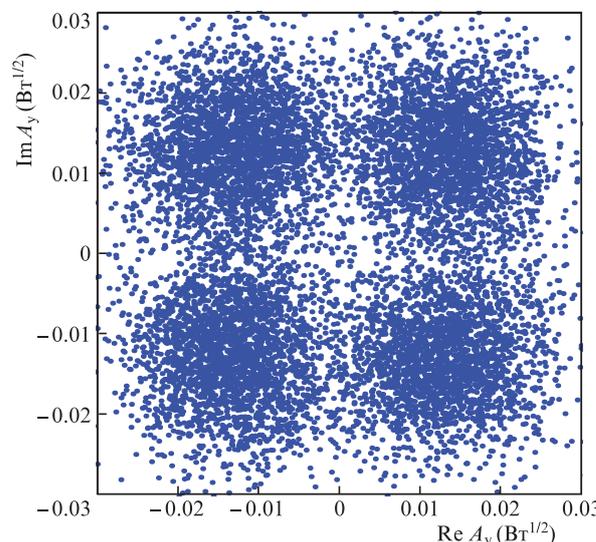


Рис.2. Сигнальная диаграмма для поляризации A_y , $\langle D \rangle = 0$, $C = 3.5$.

При положительном чирпе начальные импульсы уширяются быстрее, что уменьшает влияние нелинейных эффектов. На рис.3 изображены диаграммы A_x и A_y для сигнала с чирпом и ненулевой средней дисперсией линии связи. Видно, что качество сигнала выше по сравнению с рис.2. Вероятность ошибки BER составляет теперь 1.2×10^{-2} .

Для улучшения качества сигнала вместо отрезка волокна DCF можно использовать периодическую компенсацию дисперсии современными устройствами с малым затуханием сигнала на основе брэгговских решеток [9, 10]. В отличие от волокна с отрицательной дисперсией, эти устройства обеспечивают малые потери мощности (~1 дБ). На рис.4 приведены сигнальные диаграммы для того же набора параметров, что и на рис.3, при использовании компенсаторов дисперсии с малым затуханием. Видно, что группировка точек улучшается, при этом вероятность ошибки BER уменьшается до 2×10^{-3} . В линии связи области периодического сжатия импульсов и усиления сигнала пространственно разнесены из-за ненулевой средней дисперсии, что позволяет уменьшить нелинейное взаимодействие.

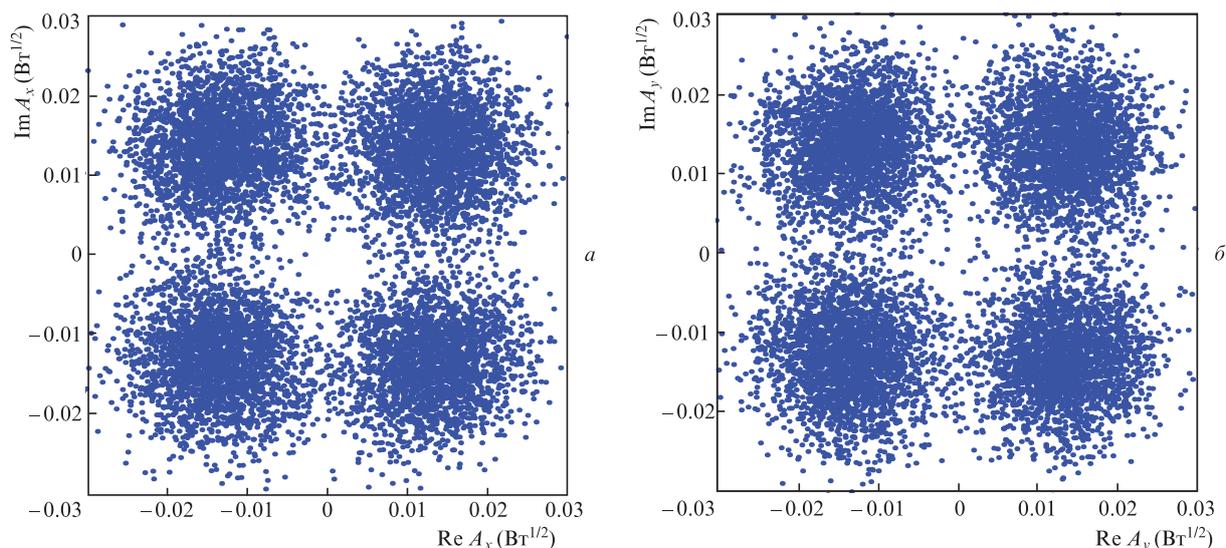


Рис.3. Сигнальные диаграммы для A_x (а) и A_y (б) при $\langle D \rangle = -1.4$ пс·нм⁻¹·км⁻¹, $C = 3.5$.

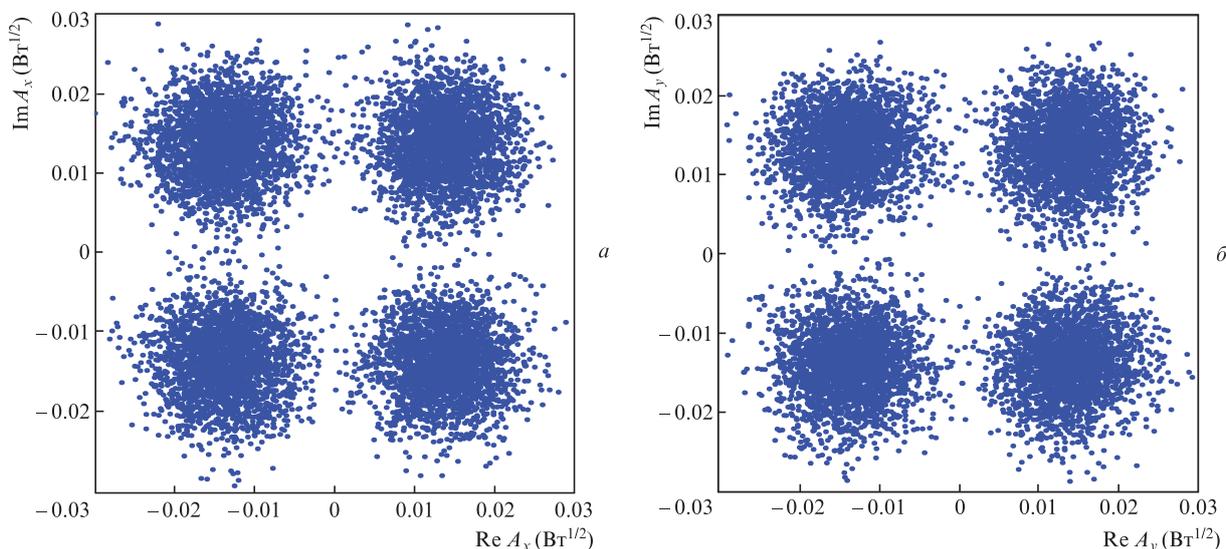


Рис.4. Сигнальные диаграммы для A_x (а) и A_y (б) при $\langle D \rangle = -1.4$ пс·нм⁻¹·км⁻¹, $C = 3.5$ и использовании компенсатора дисперсии с малым затуханием.

3. Заключение

Выполнен расчет распространения оптических импульсов в DP QPSK-линии связи с большой отрицательной дисперсией и большим положительным chirпированием. Показано, что в канале со скоростью 160 Гбит/с использование этих способов позволяет существенно уменьшить деградацию сигнала, вызванную керровской нелинейностью. Полученные результаты могут быть полезны при выборе дизайна высокоскоростной линии связи.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 1201364502).

1. Richardson D.J. *Science*, **330**, 327 (2010).

2. Essiambre R.-J., Kramer G., Foschini G.J., Goebel B. *J. Lightwave Technol.*, **25**, 662 (2010).
3. Savory S.J. *El. Lett.*, **42** (7), 407 (2006); DOI:10.1049/el:20063903.
4. Юшко О.В., Наний О.Е., Редюк А.А., Трещиков В.Н., Федорук М.П. *Квантовая электроника*, **45** (1), 75 (2015) [*Quantum Electron.*, **45** (1), 75 (2015)].
5. Гуркин Н.В., Коньшев В.А., Наний О.Е., Новиков А.Г., Трещиков В.Н., Убайдуллаев Р.Р. *Квантовая электроника*, **45** (1), 69 (2015) [*Quantum Electron.*, **45** (1), 69 (2015)].
6. Shapiro E.G., Fedoruk M.P., Shapiro A.D., Ania-Castanon J.D., Turitsyn S.K. *Opt. Commun.*, **250** (1–3), 202 (2005).
7. Шапиро Е.Г., Шапиро Д.А. *Квантовая электроника*, **48** (12), 1157 (2018) [*Quantum Electron.*, **48** (12), 1157 (2018)].
8. Агравал Г. *Применение нелинейной волоконной оптики* (СПб: Лань, 2011).
9. Sumetsky M., Eggleton B.J. *Opt. Fiber. Commun. Rep.*, **2**, 256 (2005).
10. Dar A.R., Jha R.K. *Opt. Quant. Electron.*, **49** (3), 108 (2017).