

# Подавление нелинейного взаимодействия в высокоскоростном оптическом канале с компенсацией дисперсии

Е.Г.Шапиро, Д.А.Шапиро

*Выполнено численное моделирование распространения оптических импульсов с большим положительным chirпом в линии связи со скоростью передачи данных 40 Гбит/с и большой средней отрицательной дисперсией. Показано, что использование этих механизмов эффективно подавляет нелинейное взаимодействие импульсов и существенно улучшает качество передачи сигнала.*

*Ключевые слова:* волоконно-оптические линии связи, математическое моделирование, нелинейное уравнение Шредингера.

## 1. Введение

Растущая потребность в увеличении скорости и объема передаваемой информации требует увеличения пропускной способности линий связи. Задача становится особенно актуальной, поскольку согласно прогнозам необходимая информационная емкость магистральных линий через несколько лет превысит шенноновский предел [1, 2]. Для решения этой проблемы используются когерентное детектирование, многоканальная передача, новые форматы модуляции, повышение скорости передачи в одном канале. Дизайн волоконно-оптических линий связи (способы усиления сигнала, оптимизация дисперсионных карт и др.) также может увеличить информационную емкость [3, 4].

В настоящей работе предложен новый режим распространения сигнала, в котором используются большая средняя отрицательная дисперсия и большое положительное chirпирование. Основные факторы искажения сигнала – шумы усилителей и нелинейное взаимодействие. Для подавления керровской нелинейности ранее применялся солитонный формат с управляемой дисперсией [5, 6]. Предложенный дизайн канала связи является новым. В таком канале солитонов с управляемой дисперсией не существует. Мы численно моделировали одноканальное распространение гауссовых оптических импульсов с битовым интервалом 25 пс в рамках нелинейного уравнения Шредингера. Численный расчет выполнен для четырехуровневой амплитудной модуляции с большим разбросом мощностей оптических импульсов. Оказалось, что одновременное использование большой средней отрицательной дисперсии и большого положительного chirпирования существенно улучшает качество передачи сигнала.

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

## 2. Численное моделирование

Линия связи состояла из 20 периодических секций вида SMF (100 км) + EDFA + DCF + EDFA, где SMF – стандартное одномодовое волокно, EDFA – волоконные эрбиевые усилители (коэффициент шума 4.5 дБ), DCF – компенсирующее волокно. Параметры элементов схемы приведены ниже.

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

Средняя дисперсия линии связи зависит от длины DCF-участка. Накопленная дисперсия компенсировалась на приемном устройстве. Мы рассмотрели передачу информации, которая кодируется четырьмя уровнями амплитуды гауссовых импульсов шириной 8.3 пс.

Сигнал задавался в виде

$$S(t) = \sum_n a_n(t - nT), \quad a_n(\tau) = B_n \exp\left(-\frac{\tau^2 - 2i\varphi_n \tau^2}{2T_0^2}\right),$$

где  $T = 25$  пс – битовый интервал;  $B_n = B \xi_n$  – амплитуда;  $\xi_n \in \{1, 2, 3, 4\}$  – случайная величина, принимающая одно из указанных значений с вероятностью 1/4;  $T_0$  – параметр ширины импульса, равный 4 пс;  $\varphi_n$  – chirп. Таким образом, импульс занимал примерно треть битового интервала. Мощности передаваемых импульсов существенно различались, наименьшая средняя мощность соответствовала  $\xi_n = 1$ . В численном расчете  $B = 0.0065$ , что отвечает средней мощности импульса 1.3 мВт при  $\xi_n = 1$ . Обозначим  $\varphi_n = c_i$  chirп импульса, соответствующего  $\xi_n = i$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ), т. е.  $c_1$  – chirп импульса с наименьшей мощностью ( $\xi_n = 1$ ), а  $c_4$  – с наибольшей ( $\xi_n = 4$ ). Положим  $\varphi = (c_1, c_2, c_3, c_4)$ .

Для подавления керровской нелинейности мы использовали большую отрицательную дисперсию линии связи и большое положительное chirпирование. Для демон-

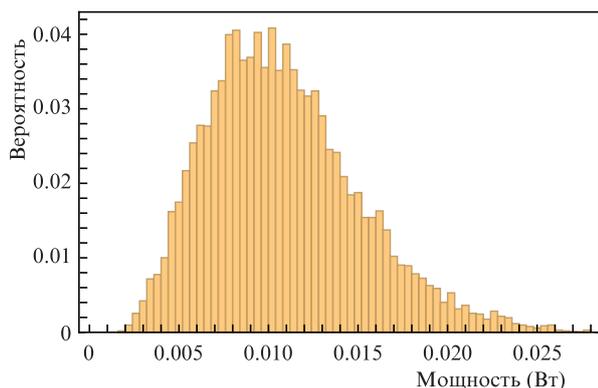


Рис.1. Гистограмма сигнала при средней хроматической дисперсии  $\langle D \rangle = 0$  и  $\varphi = (0, 0, 0, 0)$ .

страции влияния этих механизмов на подавление нелинейного искажения были вычислены функции распределения средних битовых мощностей на приемном устройстве для линий с использованием и без использования указанных механизмов. Объем выборки составлял 20400.

На рис.1 приведена функция распределения сигнала для линии без чирпа и с нулевой средней дисперсией. Видно, что пики гистограммы сливаются и импульсы невозможно корректно распознать. На рис.2 показана гистограмма сигнала только с положительным чирпом или только со средней отрицательной дисперсией. Пики здесь тоже невозможно различить.

На рис.3,а приведена гистограмма сигнала на приемнике при одновременном действии отрицательной дисперсии и чирпа. Пики, соответствующие четырем уровням амплитудной модуляции, хорошо различимы. Следовательно, использование большой отрицательной дис-

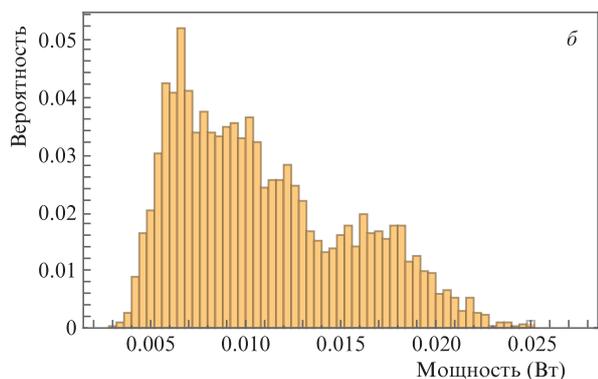
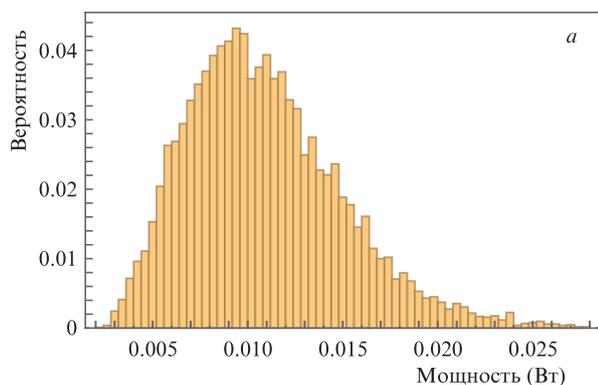


Рис.2. Гистограммы сигналов при  $\langle D \rangle = -1.2$  пс·нм<sup>-1</sup>·км<sup>-1</sup>,  $\varphi = (0, 0, 0, 0)$  (а) и  $\langle D \rangle = 0$ ,  $\varphi = (15, 13, 19, 7)$  (б).

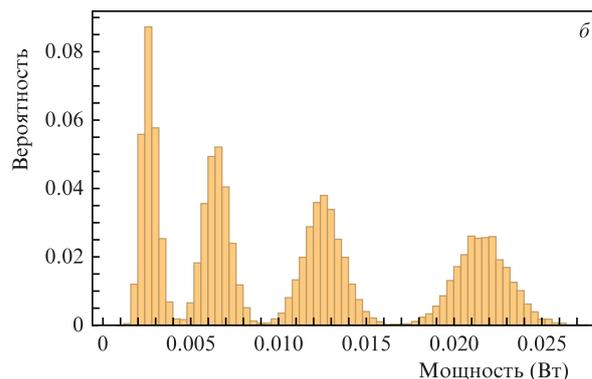
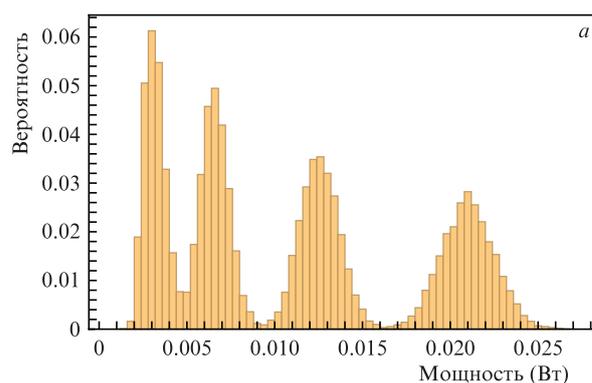


Рис.3. Гистограммы сигналов при  $\langle D \rangle = -1.2$  пс·нм<sup>-1</sup>·км<sup>-1</sup> и  $\varphi = (7, 7, 7, 7)$  (а), а также  $\varphi = (15, 13, 19, 7)$  (б).

персии и положительного чирпирования существенно улучшает качество передачи сигнала. Максимальная вероятность некорректного распознавания отвечает малым значениям амплитуды ( $\xi_n = 1$  и 2). Полное число ошибок равно 165, что для выборки объемом 20400 соответствует вероятности появления ошибки  $8.1 \times 10^{-3}$ . Число ошибок распознавания в области первых двух пиков гистограммы равно 142.

Параметры  $c_i$  положительного чирпирования оптических импульсов можно рассматривать как параметры для дальнейшей оптимизации линии связи с точки зрения качества передачи сигнала. На рис.3,б приведена гистограмма сигнала, в котором чирп подобран индивидуально для каждого уровня амплитуды сигнала. В этом случае полное число ошибок равно 15, что дает вероятность ошибки  $7.1 \times 10^{-4}$ . Поэтому, если использовать разные чирпы для отличающихся по мощности импульсов, вероятность ошибки можно заметно уменьшить.

В работе [7] для линии с ООК форматом (on-off-keying) передачи данных было показано, что большая отрицательная дисперсия улучшает качество передачи сигнала, однако для четырехуровневого амплитудного формата необходимо одновременное использование предложенных механизмов подавления керровской нелинейности. Подавление керровской нелинейности обусловлено тем, что усиление сигнала и сжатие оптических импульсов происходят в разных точках пространства. Поэтому сжатый импульс имеет относительно малую мощность и, следовательно, меньшую деградацию из-за самовоздействия. Положительное чирпирование вызывает быстрое уширение импульсов, что также уменьшает нелинейное взаимодействие.

Предложенный режим распространения сигнала – нелинейный. Кроме того, в отличие от модели, описанной в

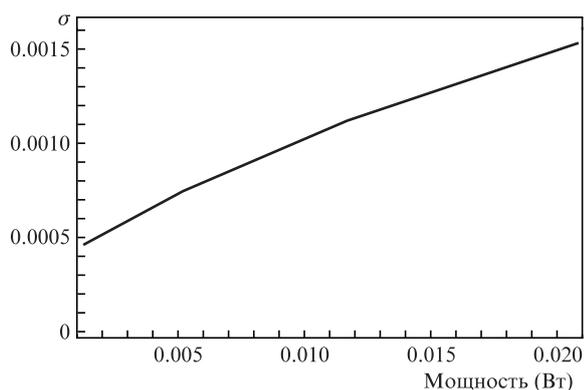


Рис.4. Среднеквадратичное отклонение  $\sigma$  битовой мощности.

[8], нелинейное взаимодействие не является искажением, обусловленным дополнительным нелинейным шумом. Это видно из того, что среднеквадратичные отклонения регистрируемых амплитуд заметно различаются (рис.3) для разных по мощности оптических импульсов. На рис.4 приведена зависимость среднеквадратичного отклонения от мощности импульсов. Видно, что эта зависимость монотонно растёт.

### 3. Заключение

Впервые выполнен расчет распространения оптических импульсов с большим положительным чирпом в линии с большой отрицательной дисперсией. Показано, что

в канале со скоростью передачи данных 40 Гбит/с в этом случае существенно уменьшается деградация сигнала, вызванная нелинейными эффектами. Рассчитана зависимость дисперсии функции распределения регистрируемых битов на приемнике от мощности оптических импульсов для четырехуровневого амплитудного формата. Полученные результаты могут быть полезны при выборе дизайна линии связи. Возможность выбирать мощности передаваемых символов с учетом их дисперсии [9] при балансе chirпирования и дисперсионной карты линии связи – это дополнительная возможность для оптимизации волоконной линии с высокой скоростью передачи данных.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 16-11-10133).

1. Shannon C. *Bell Syst. Tech. J.*, **27**, 379; 623 (1948).
2. Richardson D.J. *Science*, **330**, 327 (2010).
3. 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)].
4. 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)].
5. Gabitov I.R., Shapiro E.G., Turitsyn S.K. *Phys. Rev. E*, **55**, 3624 (1997).
6. Агравал Г. *Применение нелинейной волоконной оптики* (С.-Петербург: Лань, 2011).
7. Shapiro E.G., Fedoruk M.P., et al. *Opt. Commun.*, **250** (1-3), 202 (2005).
8. Poggiolini P., Carena A., Curri V., Bosco G., Forghieri F. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **23**, 742 (2011).
9. Шапиро Е.Г., Шапиро Д.А. *Автометрия*, **54** (4), 108 (2018).