

ПРЕИМУЩЕСТВА СОЛИТОННОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ НА БОЛЬШИЕ РАССТОЯНИЯ

Юшко О.В.^{1,2*}, Редюк А.А.^{1,2}, Федорук М.П.^{1,2}, Турицын С.К.^{2,3}

¹Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск, Россия

²Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск, Россия

³Институт фотонных технологий, университет Астона, г. Бирмингем, Англия

*E-mail: olesya.yushko@gmail.com

Широко известно, что пропускная способность и протяженность современных многоканальных волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) ограничена наличием нелинейного взаимодействия спектральных каналов между собой и шумом усилителей. Подобное взаимодействие носит сложный, комплексный характер, в связи с чем его компенсация является актуальной, но до сих пор нерешенной задачей. Благодаря современным технологиям плотной упаковки спектральных каналов OFDM и когерентному детектированию сигнала, возможна высокоскоростная передача данных на расстояния порядка тысячи километров. Тем не менее, при высоких мощностях сигнала, а также при передаче информации на большие расстояния, нелинейные эффекты играют значительную роль и искажения велики. Даже используя новейшие способы компенсации волоконных эффектов, например, метод обратного распространения сигнала [1], невозможно полностью исключить нелинейное взаимодействие сигнала и шума.

В работе проведено исследование характеристик солитонной когерентной передачи данных на расстояния, характерные для трансокеанских линий связи, при значительном влиянии нелинейности. Преимуществом солитонного импульса является непрерывная взаимная компенсация дисперсионных и нелинейных эффектов, которая поддерживает форму сигнала при распространении по волокну. Методами математического моделирования было показано, что солитонные ВОЛС способны обеспечить высокую эффективность в передаче данных на большие расстояния. В том числе, способны поддерживать модуляцию сигнала высокого порядка.

Для описания распространения электромагнитного поля по линии связи с равномерным ВКР-усилением в работе использовалось обобщенное нелинейное уравнение Шредингера (НУШ) [1]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + i \gamma |A|^2 A + i N(z, t), \quad (1)$$

где $A(z, t)$ – комплексная огибающая амплитуды поля, t – время, z – расстояние вдоль волокна, β_2 – параметр хроматической дисперсии, γ – параметр нелинейности. Член уравнения $N(z, t)$ описывает генерацию шума, возникающего вследствие оптически усиленной спонтанной эмиссии. В линиях связи с использованием равномерного ВКР усиления оптические потери компенсируются непрерывно таким образом, что среднее значение мощности сигнала остается постоянным на протяжении всей дистанции. В качестве модели шума используется модель аддитивного белого Гауссова шума со спектральной плотностью на поляризацию: $N_{ASE} = n_{sp} \hbar \omega \alpha L$, где \hbar – постоянная Планка, ω – частота, α – потери, L – дистанция распространения, n_{sp} – параметр спонтанной эмиссии. Численное моделирование проводилось на основе Фурье-метода расщепления по физическим процессам [2]. Оценка линии связи проводилась на основе параметра спектральной эффективности:

$$SE = \log_2 \frac{M}{T_s \Delta \nu_{ch}}, \quad (2)$$

где M – порядок модуляции сигнала, T_s – символичный интервал, $\Delta \nu_{ch}$ – расстояние между спектральными каналами.

В качестве формата модуляции сигнала в солитонных ВОЛС был выбран комбинированный непрерывный формат модуляции по фазе и положению импульса, что позволило получить оценку максимально достижимой спектральной эффективности передачи данных. Так, на Рис 1 (а) изображена начальная констелляционная диаграмма сигнала из 64 импульсов. Поскольку фаза сигнала случайна, она представляет собой точки на окружности. На Рис 1 (в) изображена начальная индикаторная диаграмма сигнала: как видно, импульс может располагаться случайным образом на заданном временном отрезке внутри символического интервала. Оценка спектральной эффективности проводилась с помощью расчета временных и фазовых отклонений. Для этого после распространения все импульсы сдвигались в центр символического интервала относительно начального положения (см. Рис 1 (г)), а также производился индивидуальный поворот фазы импульса на угол, обратный начальному (см. Рис 1 (б)). По оценкам размеров «облака» на констелляционной диаграмме и

временных флуктуаций на индикаторной, рассчитывалось количество положений и фаз, которые возможно использовать для кодировки информации.

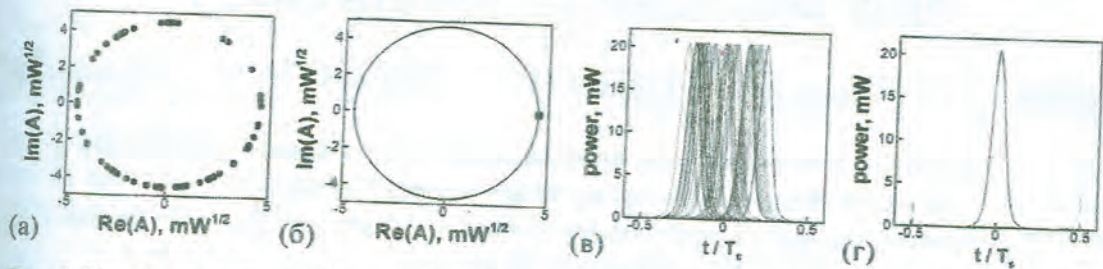


Рис.1. Комбинированный формат модуляции по фазе и положению импульса: начальные констелляционная и индикаторная диаграммы сигнала (а, в), а так же констелляционная и индикаторные диаграммы после процедуры обратного поворота

На Рис. 2 приведены результаты численного моделирования солитонных линий связи. Каждая точка на графике представляет собой отдельный расчет ЛС длиной z , в конце которой выполняется процедура обратного распространения сигнала (ОРС) на ту же длину z для компенсации нежелательных эффектов волокна. Моделирование ОРС осуществлялось при помощи решения уравнения (1) в отсутствие шумового члена и с противоположными знаками параметров в правой части. Для моделирования использовались параметры стандартного одномодового волокна ($D = 17$ пс/нм/км, $\gamma = 1.27$ Вт $^{-1}$ км $^{-1}$, $\alpha = 0.2$ дБ/км); передача осуществлялась по 15 частотным каналам. Параметры солитонной передачи сигнала, такие как ширина солитонного импульса, расстояния между каналами и другие, выбирались по решениям оптимизационных задач.

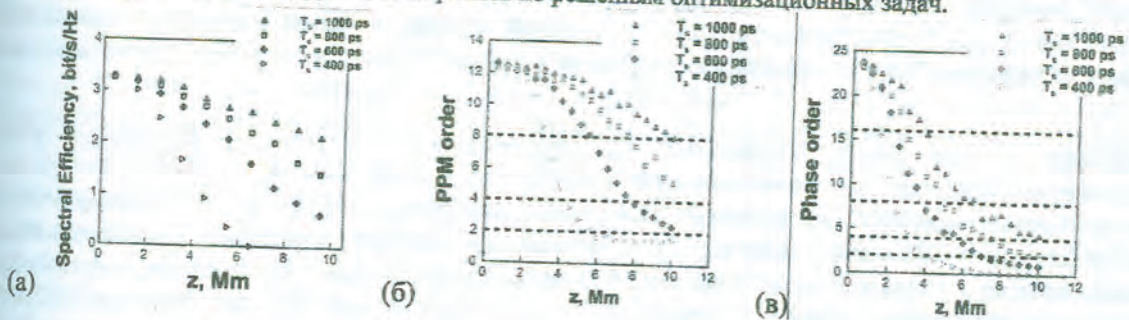


Рис.2. (а) Спектральная эффективность солитонных ВОЛС как функция расстояния, а также (б) достижимый порядок модуляции по положению и (в) по фазе импульса как функция расстояния

На Рис. 2 (а) показано уменьшение значения спектральной эффективности солитонных ВОЛС с увеличением длины ЛС. Подобный спад является результатом действия шумовых эффектов - эффектов Гордона-Хауса и Гордона-Молленауэра. Кривые, соответствующие разным символьным скоростям распространения, берут начало из одной точки, но имеют различный характер: кривой, соответствующей наибольшей символьной скорости ($T_s = 400$ пс) в случае солитонных ВОЛС соответствует и наибольшая мощность сигнала. В такой ЛС сигнал будет испытывать наибольшие искажения. Тем не менее, для больших значений T_s спектральная эффективность уменьшается с расстоянием практически линейно, т.е. медленнее, чем широко известный закон $SE \sim \log(1/z)$. На Рис. 2 (б) показана оценка максимального числа положений для модуляции сигнала, Рис. 2 (в) - числа фаз для модуляции сигнала. Видно, что солитоны «небольших» символьных скоростей способны сохранять модуляцию высокого порядка на расстояния порядка 10 Мм (например, 8-PPM/QPSK).

С помощью методов численного моделирования мы продемонстрировали, что на больших расстояниях распространения солитонные ВОЛС способны поддерживать форматы модуляции высокого порядка, дающие преимущество в полной битовой скорости передачи информации при фиксированной частотной полосе.

Исследование выполнено при поддержке проекта № 14.В25.31.0003 (Министерство образования и науки Российской Федерации), а также при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-01-31285 мол_а.

Литература

1. Essiambre R.J., Kramer G., et al, *J. Lightwave Technology* 28(4), 662-701 (2010)
2. Agrawal G.P. *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press (2001)