

## Математическое моделирование солитонных волоконно-оптических линий связи

О.В. Юшко<sup>1,2,\*</sup>, А.А. Редюк<sup>1,2</sup>, М.П. Федорук<sup>1,2</sup>, С.К. Турицын<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>Институт Фотоники университета Астана, Бирмингем, Англия

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

Увеличение спектральной эффективности волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) является одним из приоритетных направлений развития в области телекоммуникационных технологий. Всё больший интерес вызывают солитонные линии связи [1]: возможность поддержания непрерывного баланса эффектов дисперсии и нелинейности в солитонных ВОЛС за счёт специальной формы огибающей импульса позволяет сохранять высокое значение спектральной эффективности на больших расстояниях.

В настоящей работе исследуется спектральная эффективность солитонных когерентных ВОЛС, а также основные эффекты, накладывающие ограничения на её рост: эффекты временного и фазового «дрожания» солитонов. Кроме этого, проводится сравнение с «традиционными» ВОЛС – линиями связи, в которых выполняется компенсация только дисперсионных эффектов. В таких линиях основным ограничением роста спектральной эффективности является нелинейный эффект Керра [2].

Для описания распространения электромагнитного поля по оптоволокну использовалось обобщённое нелинейное уравнение Шрёдингера (НУШ) [3]:

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

где  $A(z, t)$  – комплексная огибающая амплитуды поля,  $t$  – время,  $z$  – расстояние вдоль волокна,  $\beta_2$  – параметр хроматической дисперсии,  $\gamma$  – параметр нелинейности. Член уравнения  $N(z, t)$  описывает генерацию шума, возникающего вследствие оптически усиленной спонтанной эмиссии (*ASE – Amplified Spontaneous Emission*). В линиях связи с использованием Рамановского усиления оптические потери компенсируются непрерывно таким образом, что среднее значение мощности сигнала остаётся постоянным на протяжении всей дистанции распространения. 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,  $\omega$  – частота,  $\alpha$  – потери,  $L$  – дистанция распространения,  $n_{sp}$  – параметр спонтанной эмиссии. Численное моделирование проводилось на основе Фурье-метода расщепления по физическим процессам (*Split Step Fourier Method*) [3]. Моделируемая линия связи с распределённым рамановским усилением состояла из передатчика, оптического волновода и приёмника.

С помощью численных расчётов было показано, что в области высоких значений отношения сигнал/шум (*SNR*) солитонные ВОЛС обладают большим значением спектральной эффективности (см. Рис.1). Более того, сдвиг «солитонной» кривой вправо говорит о преимуществе солитонной передачи сигнала в 5 дБ. За счёт этого сдвига, при одном и том же значении спектральной

эффективности, возможна передача сигнала на большие расстояния по сравнению с передачей по «традиционным» ВОЛС.

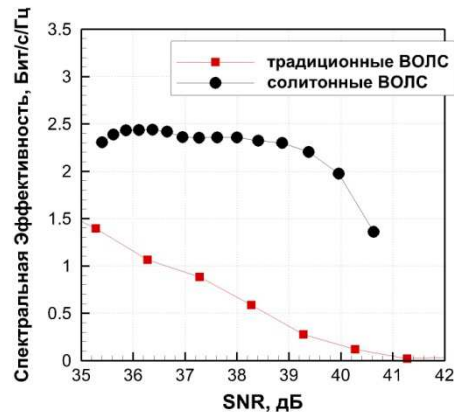


Рис.1. Спектральная эффективность как функция отношения сигнал/шум в «традиционных» и солитонных ЛС.

Также были проанализированы основные эффекты, ограничивающие рост спектральной эффективности солитонных ВОЛС: эффекты Гордона-Хауса и Гордона-Молленауэра, проявляющиеся в случайном отклонении положения центра импульса и его фазы соответственно от начального значения. Оба эффекта возникают вследствие накопления шума усиленной спонтанной эмиссии, однако частично могут быть подавлены на приёмнике при помощи методов цифровой обработки сигнала. При помощи математического моделирования было показано, что в когерентных ВОЛС больший вклад в разрушение сигнала вносит эффект Гордона-Молленауэра, в то время как эффект Гордона-Хауса может быть эффективно скомпенсирован методом обратного распространения сигнала [4].

В настоящей работе продемонстрированы принципиальные возможности солитонных линий связи, проведено сравнение с современными «традиционными» линиями. Кроме того, проанализированы причины уменьшения спектральной эффективности при росте отношения сигнал/шум.

Исследование выполнено при поддержке проекта №14.В25.31.0003 (Министерство образования и науки Российской Федерации), а также при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-01-31258.

## Литература

- [1] M. Nakazawa, H. Kubota, K. Suzuki, E. Yamada, *Chaos* **10**, 486-512 (2000)
- [2] R.-J. Essiambre, P. J. Winzer, *Journal of Lightwave Technology* **28**, 662-701 (2010)
- [3] Г. Агравал, *Нелинейная волоконная оптика*, (М: Мир, 1996)
- [4] E. Ip, J. M. Kahn, *Journal of Lightwave Technology* **26**, 3416-3425 (2008)