

НГУ, ИВТ СО РАН

Сидельников Олег Сергеевич, o.s.sidelnikov@gmail.com

Механико-математический факультет

6-й курс, группа 12181

Дипломная работа

Научный руководитель: Федорук Михаил Петрович (mifester@gmail.com)

Название работы: "Математическое моделирование нелинейного распространения в многомодовых волокнах на основе уравнения Манакова"

Постановка задачи: Исследование производительности систем цифровой связи в режимах сильной и слабой связи мод, основанных на многомодовом волокне со ступенчатым и градиентным профилем показателя преломления

Современное состояние проблемы: В настоящее время проводятся теоретические и практические исследования систем цифровой связи, основанных на многомодовых волокнах:

R. Ryf, S. Randel, A. H. Gnauck, C. Bolle, R.-J. Essiambre, P. J. Winzer, D. W. Peckham, A. McCurdy and R. Lingle, "pace-division multiplexing over 10 km of three-mode fiber using coherent 6×6 MIMO processing"

E. Ip, E.; N Bai, Y.-K. Huang, E. Mateo, F. Yaman, M.-J. Li; S. Bickham, S. Ten, J. Linares, C. Montero, V. Moreno, X. Prieto, V. Tse, K. Chung, A. Lau, H.-Y. Tam, C. Lu, Y. Luo, G.-D. Peng and G. Li; "88 \times 3 \times 112-Gb/s WDM transmission over 50 km of three-mode fiber with inline fewmode fiber amplifier"

B. Zhu, T. F. Taunay, M. Fishteyn, X. Liu, S. Chandrasekhar, M. F. Yan, J. M. Fini, E. M. Monberg, and F. V. Dimarcello, Opt. Express 19, 16665-16671 (2011)

J. Sakaguchi, B. J. Puttnam, W. Klaus, Y. Awaji, N. Wada, A. Kanno, T. Kawanishi, K. Imamura, H. Inaba, K. Mukasa, R. Sugizaki, T. Kobayashi, and M. Watanabe, J. Lightwave Technol. 31, 554-562 (2013).

1 Описание работы

В работе моделируется процесс распространения электромагнитного излучения в многомодовых волокнах. В качестве основной модели была рассмотрена модель, предложенная Agrawal и Mecozi, основанная на уравнениях Манакова, описывающая нелинейное распространение в многомодовых

волокнах. Нелинейные эффекты распространения являются основным ограничением волоконно-оптических систем связи, поэтому в работе рассматривается нелинейная модель распространения. Целью работы является поиск оптимальной конфигурации системы цифровой связи в зависимости от количества распространяющихся мод, режима связи мод и профиля показателя преломления многомодового волокна. Для сравнения различных конфигураций оценивается производительность каждой системы цифровой связи путем нахождения коэффициента битовой ошибки как функции от оптического отношения сигнал/шум.

2 Используемые алгоритмы

полное электрическое поле в многомодовом волокне можно записать как сумму по M различным пространственным модам волокна в частотной области:

$$\tilde{E}(x, y, z, \omega) = \sum_m^M e^{i\beta_m(\omega)z} \tilde{A}_m(z, \omega) F_m(x, y) / \sqrt{(N_m)},$$

где $\tilde{A}_m(z, \omega) = [\tilde{A}_{mx}(z, \omega), \tilde{A}_{my}(z, \omega)]^T$ является преобразованием Фурье медленно меняющейся огибающей поля во временной области m -ой моды. Данное выражение включает в себя медленно меняющиеся амплитуды обеих компонент поляризации пространственной моды m с пространственным распределением $F_m(x, y)$ и константой распространения $\beta_m(\omega)$, выраженной в виде диагональной матрицы для учета двойного лучепреломления, то есть $\beta_m = \text{diag}[\beta_{mx} \ \beta_{my}]$.

В работе были рассмотрены два важных случая распространения в многомодовых волокнах, представляющие практический интерес, - режимы слабой и сильной связи. В режиме слабой связи линейная связь между различными пространственными модами слаба по сравнению со связью, вызванной двойным лучепреломлением, между двумя поляризационными компонентами одной пространственной моды. В режиме сильной связи оба типа связи одного порядка и происходят случайным образом.

В режиме слабой связи мод нелинейное распространение в многомодовом волокне описывается уравнением Манаква в режиме слабой связи:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{A}_p}{\partial z} + \langle \delta\beta_{0p} \rangle \bar{A}_p + \langle \delta\beta_{1p} \rangle \frac{\partial \bar{A}_p}{\partial t} + i \frac{\beta_{2p}}{2} \frac{\partial^2 \bar{A}_p}{\partial t^2} = \\ = i\gamma (f_{pppp} \frac{8}{9} |\bar{A}_p|^2 + \sum_{m \neq p} f_{mmp} \frac{4}{3} |\bar{A}_m|^2) \bar{A}_p, \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$\langle \delta\beta_{0p} \rangle = \frac{1}{2}(\beta_{px} + \beta_{py}) - \beta_g, \quad \langle \delta\beta_{1p} \rangle = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \beta_{px}}{\partial \omega} \Big|_{\omega_0} + \frac{\partial \beta_{py}}{\partial \omega} \Big|_{\omega_0} \right) - \frac{1}{v_g}.$$

В режиме сильной связи мод нелинейное распространение в многомодовом волокне описывается уравнением Манаква в режиме сильной связи:

$$\frac{\partial \mathcal{A}}{\partial z} + \frac{1}{v} \frac{\partial \mathcal{A}}{\partial t} + i \frac{\bar{\beta}_2}{2} \frac{\partial^2 \mathcal{A}}{\partial t^2} = i \gamma \kappa |\mathcal{A}|^2 \mathcal{A}, \quad (2)$$

где

$$\kappa = \sum_{k \leq l}^M \frac{32}{2^{\delta_{kl}}} \frac{f_{kkl}}{6M(2M+1)},$$

$1/v = \text{trace}(\mathcal{B}_1)/2M$ - средняя обратная групповая скорость и $\bar{\beta}_2 = \text{trace}(\mathcal{B}_2)/2M$ - средняя дисперсия групповой скорости.

Уравнения распространения решались методом Фурье расщепления по физическим процессам (split-step Fourier method, SSFM). Чтобы понять принцип метода SSFM, удобно записать каждое из уравнений в виде

$$\frac{\partial A}{\partial z} = (\hat{D} + \hat{N})A,$$

где \hat{D} - это дифференциальный оператор, учитывающий дисперсию, а \hat{N} - это нелинейный оператор, который соответствует эффектам нелинейности волокна при распространении импульса. Для решения уравнений использовался симметричный метод Фурье расщепления по физическим процессам:

$$A(z+h, T) \approx \exp\left(\frac{h}{2}\hat{D}\right) \exp(h\hat{N}) \exp\left(\frac{h}{2}\hat{D}\right) A(z, T).$$

Эта схема имеет второй порядок точности по шагу h .

При численном решении использовалась математическая библиотека Intel MKL, использовались функции из компонент DFT, BLAS, LAPACK. Сборка осуществлялась при помощи Intel C++ Compiler. Для распараллеливания алгоритмов использовалась связка MPI + OpenMP.

3 Полученные результаты

Рассматривалось волокно со ступенчатым и градиентным профилем показателя преломления, в режимах слабой и сильной связи мод, в котором данные передавались по различным комбинациям пространственных мод, и сравнивалась производительность системы в каждом из рассмотренных случаев. Для передачи данных используется уплотнение по поляризации (polarization-division multiplexing, PDM) совместно с квадратурной фазовой манипуляцией (quadrature phase-shift keying, QPSK). Для формирования импульса используется фильтр с характеристикой типа “приподнятый

косинус”. Это позволяет уменьшить полосу пропускания передаваемого сигнала и минимизировать межсимвольную интерференцию.

Для исследования производительности системы при передаче сигналов по различным комбинациям пространственных мод в режиме сильной и слабой связи находился коэффициент битовых ошибок (bit-error rate, BER) как функция от оптического отношения сигнал/шум (optical signal-to-noise ratio, OSNR) в каждом случае, и сравнивались полученные результаты.

Сначала рассматривалось распространение в многомодовом волокне со ступенчатым профилем показателя преломления в режиме слабой связи мод, описываемое уравнением (1). Рис. 1 показывает BER как функцию от OSNR после передачи 114 Гб/с битовых потоков по различным комбинациям пространственных мод в многомодовом волокне. Как видно из рисунка, полученные данные согласуются с результатами из литературы.

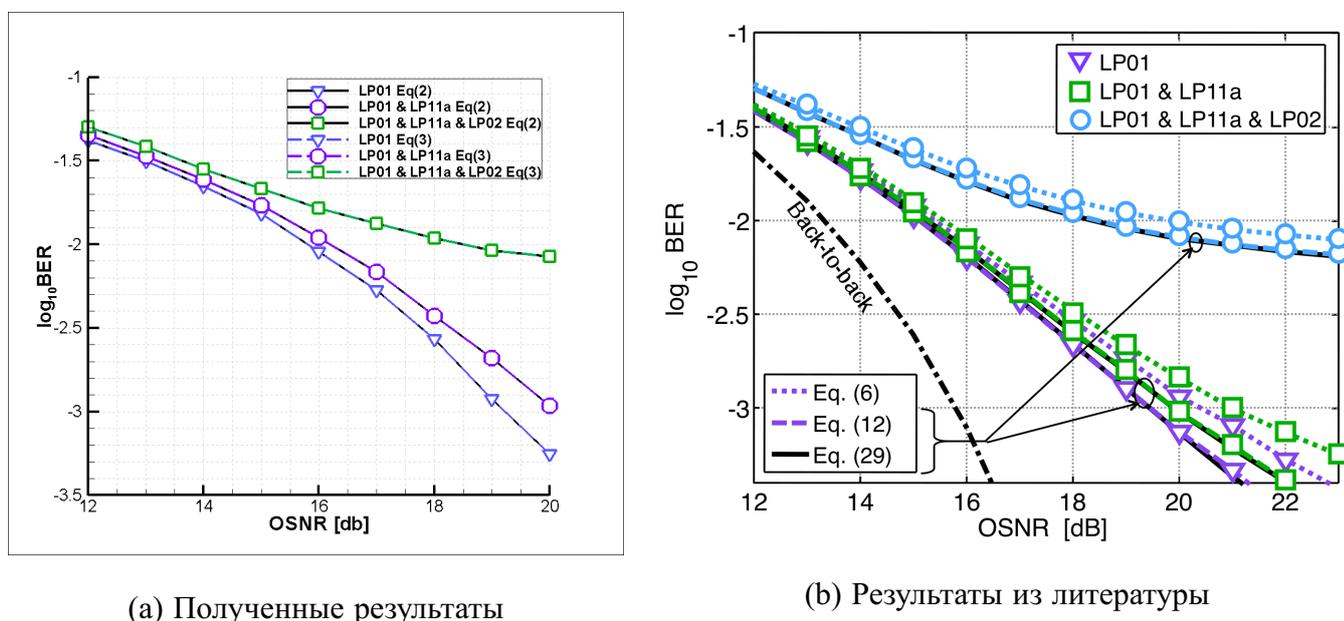


Рис. 1: BER для ступенчатого волокна в режиме слабой связи мод

Далее рассматривалось распространение в многомодовом волокне уже с градиентным профилем показателя преломления в режиме слабой связи мод, описываемое также уравнением (1). Рис. 2 показывает BER как функцию от OSNR после передачи битовых потоков по различным комбинациям пространственных мод в многомодовом волокне. Из рисунка видно, что системы передачи данных, основанные на градиентных многомодовых волокнах, имеют лучшую производительность, когда используются большее число пространственных мод для одновременной передачи данных.

Также рассматривалось распространение в многомодовом волокне со ступенчатым профилем показателя преломления в режиме сильной связи мод, описываемое уравнением (2). Рис. 3

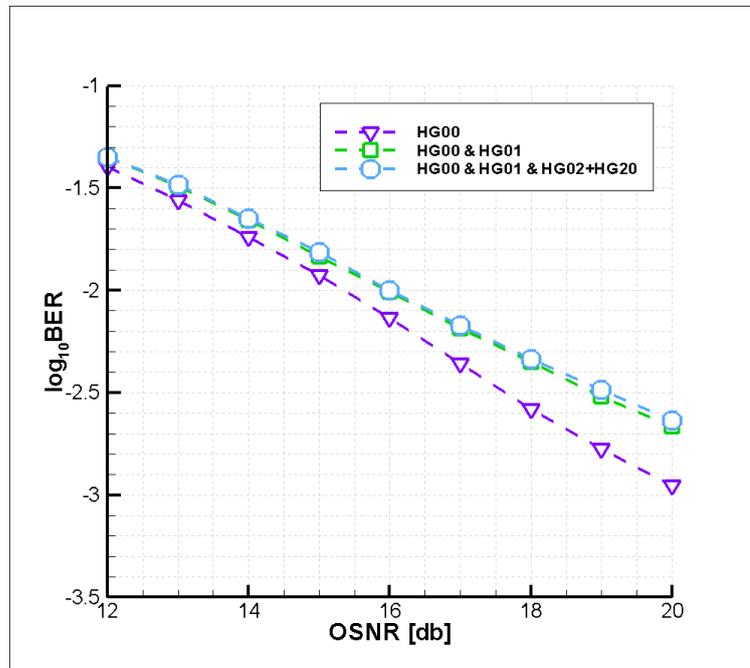


Рис. 2: BER для градиентного волокна в режиме слабой связи мод

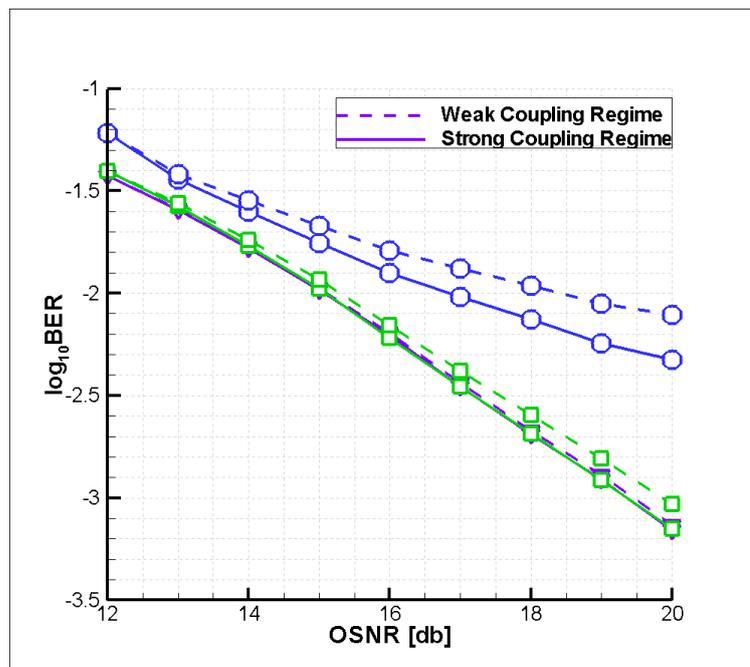


Рис. 3: BER для ступенчатого волокна в режиме сильной связи мод

показывает BER как функцию от OSNR после передачи информации по различным комбинациям пространственных мод в многомодовом волокне. Сравнение режимов слабой и сильной связи показывает, что кривые BER в обоих случаях совпадают, когда используется только одна пространственная мода волокна. Тем не менее, режим сильной связи приводит к меньшему BER при передаче данных с использованием нескольких пространственных мод.

4 Эффекты от использования кластера в достижении целей работы

Расчеты проводились с помощью быстрого преобразования Фурье, поэтому использование кластера существенно сократило время вычисления. При расчетах использовалось распараллеливание с помощью библиотеки MPI и численный алгоритм полностью использовал все вычислительные ядра с помощью технологии OpenMP.

5 Перечень публикаций, содержащих результаты работы

Сидельников О. С. Математическое моделирование нелинейного распространения в многомодовых волокнах на основе уравнения Манакова, *Новосибирский государственный университет*, Международная научная студенческая конференция, 2014.

6 Впечатления от работы вычислительной системы и деятельности ИВЦ НГУ, а также предложения по их совершенствованию

Впечатления положительные. Понравилась оперативность ответов при возникновении проблем.