

ИВТ СО РАН, НГУ

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

Очная форма обучения

Аспирант ИВТ СО РАН, 4-й курс

Специальность: 05.13.18

Работа проводилась в рамках написания диссертации

Научный руководитель: Федорук М.П.

Год окончания обучения: 2018

Состав коллектива:

Редюк Алексей Александрович, к.ф.-м.н., ученый секретарь ИВТ СО РАН.

Федорук Михаил Петрович, чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., ректор НГУ.

Тема работы:

Исследование влияния нелинейных эффектов на распространение оптических сигналов в многомодовых линиях связи.

Научное содержание работы:

1. Постановка задачи.

Работа посвящена исследованию влияния нелинейности на распространение оптических сигналов в многомодовых волокнах в режимах сильной и слабой связи мод. Рассмотрены многомодовые волокна со ступенчатым профилем показателя преломления и с градиентным профилем показателя преломления с «траншеей» в оболочке. Проведено сравнение режимов сильной и слабой связи при передаче по многомодовым волокнам. Выполнены исследования влияния нелинейных эффектов при увеличении числа мод в режимах сильной и слабой связи мод для различных типов многомодовых волокон.

2. Современное состояние проблемы.

Использование многомодовых волокон позволяет значительно увеличить пропускную способность оптических сетей за счет одновременной передачи сигналов по разным модам волокна. Однако, при одновременном использовании нескольких мод возникают новые эффекты, влияющие на передаваемые сигналы, такие как линейная связь мод, дифференциальная групповая задержка и нелинейные межмодовые эффекты. Для успешного использования многомодовых волокон в качестве способа увеличения скорости передачи данных необходимо исследовать и понимать каждый из этих эффектов.

На данный момент уже представлены результаты лабораторных экспериментов по передаче данных по многомодовому волокну длиной 177 км, поддерживающему распространение 6 мод [1]. Суммарная пропускная способность составила 24,6 Тбит/с при спектральной эффективности 32 бит/с/Гц. Кроме того, была продемонстрирована возможность изготовления волокон с поддержкой 15 мод, распространяющихся одновременно [2]. Поскольку одним из главных факторов, ограничивающих пропускную способность волоконно-оптических линий связи, являются нелинейные эффекты, влияние которых на оптический сигнал увеличивается с ростом его мощности, актуальными являются исследования влияния нелинейности на распространение оптических сигналов в многомодовых волокнах. Кроме того, необходимо уметь оценивать влияние нелинейных межмодовых эффектов на качество передаваемых сигналов в зависимости от количества используемых мод. В работе [3] исследовано влияние нелинейных эффектов на распространение сигнала в многомодовых волокнах

в режиме сильной связи мод. Однако модель сильной связи не всегда подходит для описания нелинейного распространения в протяженных системах передачи данных на основе многомодовых волокон. Влияние нелинейных эффектов при увеличении числа мод в случае слабой связи мод, который в настоящее время широко применяется при моделировании многомодовых линий дальней связи [4], было исследовано в работе [5].

1. R. Ryf, S. Randel, N. K. Fontaine et al. 32-bit/s/Hz spectral efficiency WDM transmission over 177-km few-mode fiber // Proc. of OFCC. 2013. P. PDP5A.1.
2. P. Sillard, D. Molin, M. Bigot-Astruc et al. Low-differential-mode-group-delay 9-LP-mode fiber // Proc. of OFCC. 2015. P. M2C.2.
3. M. Brehler, D. Ronnenberg, P.M. Krummrich Scaling of nonlinear effects in multimode fibers with the number of propagating modes // Proc. of OFCC. 2016. P. W4I.3.
4. G. Rademacher, S. Warm, K. Petermann Nonlinear interaction in differential mode delay managed mode-division multiplexed transmission systems // Optics Express. 2015. Vol. 23, No. 1. P. 55–60.
5. О. С. Сидельников, А. А. Редюк Нелинейные эффекты при передаче оптического сигнала в многомодовом волокне в режиме слабой связи мод // Квантовая электроника. 2017. Т. 47, № 4. С. 330–334.

3. Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы.

Целью данной работы является исследование влияния нелинейности на распространение оптических сигналов в многомодовых волокнах в режимах сильной и слабой связи мод. Первым рассматривалось волокно со ступенчатым профилем показателя преломления. Для исследования влияния нелинейных эффектов в многомодовых линиях связи использовалась система передачи данных, схематически изображенная на рисунке 1. Каждый передатчик генерирует 16-QAM сигналы с символьной скоростью $R_s = 28.5$ ГБод, что с учётом затрат на схемы коррекции ошибок FEC (14%) даёт битовую скорость в каждой моде 100 Гбит/с. Для формирования профиля импульсов используется фильтр с характеристикой типа “приподнятый косинус” с коэффициентом сглаживания 0.2. Линия передачи состоит из 10 пролётов многомодового волокна по 100 км каждый. В конце каждого пролёта затухание сигнала точно компенсируется с помощью оптических усилителей EDFA с коэффициентом шума усилителя $NF = 4.5$. Шум, соответствующий усиленному спонтанному излучению усилителей, добавляется к оптическому сигналу после каждого пролёта. Хроматическая дисперсия и дифференциальные групповые задержки точно компенсируются в цифровом виде при прохождении оптического сигнала через приемник. Для компенсации нелинейных эффектов для каждой принятой моды используется линейная схема, восстанавливающая фазу принятого сигнала.

В качестве канала использовалось многомодовое волокно со ступенчатым профилем показателя преломления, имеющие следующие параметры: показатель преломления сердцевины $n_{co} = 1.454$, показатель преломления оболочки $n_{cl} = 1.444$, радиус сердцевины $a = 7$ мкм. Такое волокно поддерживает распространение 4 мод без учёта вырожденных (LP01, LP11, LP02, LP21). При моделировании распространения сигналов использовались следующие параметры: потери волокна $\alpha = 0.2$ дБ/км, нелинейность волокна $\gamma = 1.4$ Вт⁻¹км⁻¹, несущая длина волны одноканального сигнала

$\lambda = 1550$ нм, количество отсчётов на каждый символ $q = 16$, общее число символов $N_S = 2^{18}$.

Влияние нелинейных эффектов на распространение оптических сигналов также исследовалось для многомодового волокна с градиентным профилем показателя преломления с “траншеей” в оболочке (ГССТ). В данном случае использовалась такая же система передачи данных, как и в случае ступенчатого волокна, за исключением другого типа многомодового волокна. Для численных экспериментов использовались следующие параметры профиля показателя преломления: $n_{co} = 1.4559$, $n_{cl} = 1.444$, $\alpha_{gr} = 2$, $\omega_1 = 15$ мк, $\omega_2 = 1$ мк, $n_{tr} = 1.44$, $\omega_3 = 4$ мк. Оптическое волокно с таким профилем поддерживает распространение девяти пространственных мод без учёта вырожденных (LP01, LP11, LP02, LP21, LP12, LP31, LP22, LP41, LP03).

4. Полученные результаты

При исследовании влияния нелинейных эффектов между собой сравнивались режимы связи мод. На рисунке 2 представлена зависимость параметра качества Q-фактор от начальной мощности сигнала для режимов сильной и слабой связи мод при передаче данных по четырём различным пространственным модам ступенчатого волокна. Как видно из рисунка, режим слабой связи мод показывает лучшее качество передачи данных по сравнению с режимом сильной связи мод. Это можно объяснить тем, что в случае сильной связи мод сигналы движутся с одинаковыми скоростями и по ходу распространения нелинейное взаимодействие между ними остаётся высоким. В случае же слабой связи сигналы в разных модах движутся с различными скоростями. Это приводит к тому, что пики импульсов по ходу распространения движутся относительно друг друга и нелинейное взаимодействие между ними уменьшается. Если же рассмотреть режим слабой связи, в котором сигналы в различных модах будут двигаться с одинаковой скоростью (синяя линия на рисунке 2), то качество передачи в данном случае окажется хуже, чем в режиме сильной связи мод. Это связано с тем, что в случае сильной связи нелинейный параметр κ будет меньше, чем нелинейная часть в режиме слабой связи мод.

Для данного профиля показателя преломления также исследовалось влияние нелинейных эффектов при увеличении числа мод в режиме сильной связи. На рисунке 3 изображена зависимость параметра качества Q-фактор, усреднённого по всем используемым модам, от начальной мощности сигнала при распространении оптических сигналов по многомодовому волокну со ступенчатым профилем показателя преломления по одной, двум, трем или четырём модам в режиме сильной связи. В данном случае увеличение числа мод приводит к ухудшению качества передачи, однако уменьшение Q-фактора замедляется для большого числа мод. Это связано с тем, что в режиме сильной связи мод нелинейный параметр κ будет уменьшаться с ростом числа используемых мод.

Для многомодового волокна с градиентным профилем показателя преломления с “траншеей” в оболочке исследовалось влияние нелинейных эффектов при увеличении числа мод в режиме слабой связи мод. На рисунке 4 изображена зависимость параметра качества Q-фактор, усреднённого по всем используемым модам, от начальной мощности сигнала при распространении сигналов по многомодовому волокну ГССТ по 1, 2, 3, 6 или 9 модам. Из рисунка видно, что с ростом числа мод качество передаваемого сигнала увеличивается, достигая разницы в 1 дБ между случаем с одной модой и девятью модами.

5. Иллюстрации, визуализация результатов.

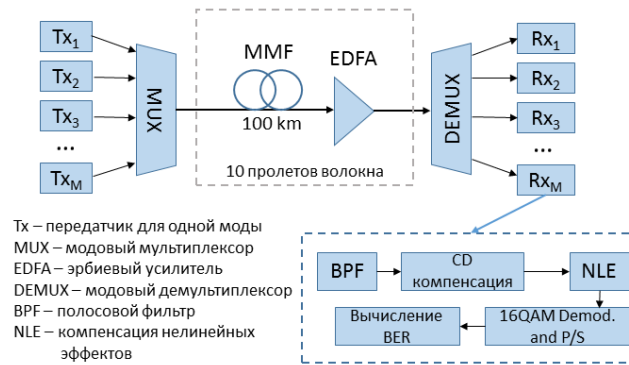


Рис. 1: Схема исследуемой линии.

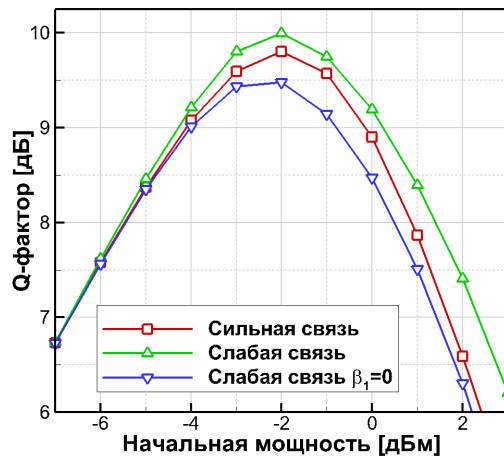


Рис. 2: Сравнение режимов связи мод для ступенчатого волокна.

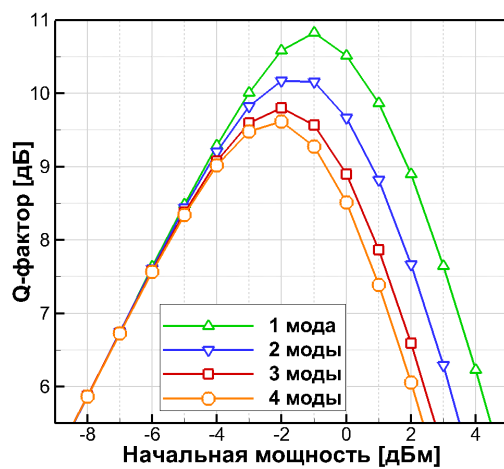


Рис. 3: Зависимость параметра Q-фактор от начальной мощности сигнала для ступенчатого волокна при передаче данных в режиме сильной связи мод.

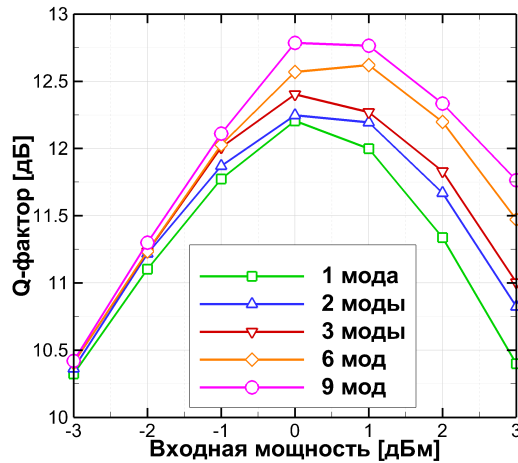


Рис. 4: Зависимость параметра Q-фактор, усреднённого по всем модам от начальной мощности сигнала для GCST волокна.

6. Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

Использование оборудования ИВЦ НГУ позволило провести численное моделирование распространения оптических сигналов по многомодовым линиям связи с высокой скоростью благодаря использованию библиотеки MKL и запуску большого числа задач одновременно для получения хорошей статистики.

7. Перечень публикаций, содержащих результаты работы.

1. О. С. Сидельников, С. Сиглетос, Ф. Феррейра, М. П. Федорук “Численное моделирование многомодовых волоконно-оптических линий связи” // Квантовая электроника. 2016. Т. 46, № 1. С. 76-80. (Импакт-фактор: 1.151)
2. О.С. Сидельников, А. А. Редюк “Компактная схема повышенного порядка точности для уравнений Манакова с учетом первой производной по времени” // Вычислительные технологии. 2017. Т. 22, № 6. С. 80–88. (Импакт-фактор: 0.625)
3. О. С. Сидельников, А. А. Редюк “Нелинейные эффекты при передаче оптического сигнала в многомодовом волокне в режиме слабой связи мод” // Квантовая электроника. 2017. Т. 47, № 4. С. 330-334. (Импакт-фактор: 1.151)