

Тема работы

Численное моделирование когерентных DWDM линий связи с канальной скоростью 100 Гбит/с

Состав коллектива

А.А. Редюк (м.н.с. лаборатории нелинейной фотоники ОЛФиИТ НИЧ НГУ (н.с. ИВТ СО РАН)), С.М. Кобцев (руководитель работы, зав. ОЛФиИТ НИЧ НГУ)

Научное содержание работы

Непрерывный рост трафика, передаваемого по магистральным волоконно-оптическим линиям связи, требует, как увеличения канальной скорости передачи данных, так и уменьшения межканального расстояния между соседними спектральными каналами (DWDM) [1-5]. К настоящему моменту коммерчески доступны линии связи с канальной скоростью 100 Гбит/с, реализованные с помощью четырёхуровневого фазового формата модуляции сигнала с мультиплексированием по поляризациям (DP-QPSK) с межканальным расстоянием 50 ГГц [6-10]. В отличие от традиционных линий связи с канальной скоростью 10 и 40 Гбит/с, в данных линиях линейные искажения сигнала, такие как хроматическая дисперсия и поляризационная модовая дисперсия, компенсируются электронным образом с помощью цифровой обработки сигнала. Более того, накапливающаяся некомпенсированная хроматическая дисперсия в DWDM DP-QPSK линиях связи с электронной компенсацией дисперсии подавляет нелинейные искажения, делая оптическую компенсацию дисперсии не только необязательной, но и вредной [6,7,10-14]. Стоит заметить, что виртуально любая величина накопленной хроматической дисперсии может быть компенсирована электронным образом, однако на практике приёмники разрабатываются так, что могут компенсировать фиксированную величину хроматической дисперсии, достаточную для абсолютного большинства существующих систем связи. Обычно эта величина составляет 70 нс/нм или приблизительно 4000 км стандартного телекоммуникационного волокна SSMF [6,7,15,16]. Однако, при определённых географических условиях необходимы линии связи большей протяжённости и, соответственно, с большей величиной накопленной хроматической дисперсии, например, линия связи длиной 9000 км между Москвой и Владивостоком. Для таких линий традиционные приёмники могут использоваться только в том случае, если накопленная хроматическая дисперсия ограничена или путём уменьшения локальной дисперсии волокна, или с помощью частичной оптической компенсации дисперсии вдоль линии в точках периодического усиления сигнала. Хотя влияние линейных и нелинейных эффектов на характеристики 100 Гбит/с DWDM DP-QPSK линий связи с полностью электронной или оптической компенсацией дисперсии хорошо изучено [6-13], характеристики линий с частичной оптической компенсацией дисперсии исследованы недостаточно подробно.

В рамках данной работы выполнено сравнение характеристик 100 Гбит/с DWDM DP-QPSK протяжённых линий связи с разными схемами частичной оптической компенсации дисперсии для различных типов волокна, включая NZDSF, SSMF, ULL и ULA. С помощью численного моделирования проведено сравнение максимальной длины передачи и запаса параметра сигнал-шум как для линий на основе волокон с уменьшенной локальной дисперсией, так и для линий, в которых для ограничения накопленной хроматической дисперсии использовалось дисперсионно-компенсирующее волокно DCF.

Для численного моделирования распространения оптического сигнала по волоконному световоду с учётом двух поляризаций использовалась система связанных нелинейных уравнений Шрёдингера (1), где A_x, A_y – комплексные огибающие амплитуды электромагнитного поля, z – расстояние вдоль волокна, t – время, β_2, β_3 – дисперсия второго и третьего порядка, γ – коэффициент нелинейности, α – коэффициент оптических потерь. Эрбиевые усилители моделировались как точечные устройства, а для описания шума усиленной спонтанной эмиссии использовалась модель белого Гауссова шума. Начальный сигнал формировался на основе четырёхуровневого фазового формата модуляции без возвращения к нулю с мультиплексированием по поляризациям NRZ DP-QPSK. В расчётах использовались случайные битовые последовательности длиной 2^{16} битов для каждой поляризации.

Для численного решения системы НУШ применялся Фурье-метод расщепления по физическим процессам [17].

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_x}{\partial z} &= -i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_x}{\partial t^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A_x}{\partial t^3} + i\gamma(|A_x|^2 + \frac{2}{3}|A_y|^2)A_x - \frac{1}{2}\alpha A_x \\ \frac{\partial A_y}{\partial z} &= -i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_y}{\partial t^2} + \frac{\beta_3}{6} \frac{\partial^3 A_y}{\partial t^3} + i\gamma(|A_y|^2 + \frac{2}{3}|A_x|^2)A_y - \frac{1}{2}\alpha A_y, \end{aligned} \quad (1)$$

На рисунке 1 показаны три рассмотренных конфигурации линии связи: на основе однородных пролётов с полной и частичной электронной компенсацией хроматической дисперсии и на основе комбинированных пролётов с полной электронной компенсацией дисперсии.

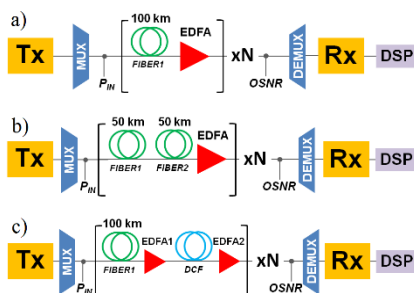


Рис. 1. Конфигурации линий связи: однородные пролёты с полной (а) и частичной (с) электронной компенсацией хроматической дисперсии и комбинированные пролёты с полной электронной компенсацией дисперсии (b).

Для верификации математической модели было проведено сравнение результатов численных расчётов с результатами лабораторных экспериментов для линии, состоящей из 12 пролётов по 100 км каждый. Сравнение проводилось по зависимости коэффициента ошибки от средней канальной мощности сигнала, вводимого в пролёт, для пролётов на основе волокон SSMF, NZDSF и комбинированных пролётов SSMF-NZDSF. Как видно из рисунка 2, линии на основе волокна NZDSF соответствует самый высокий коэффициент ошибки и самая низкая оптимальная мощность сигнала, что обусловлено его большим коэффициентом нелинейности по сравнению с волокном SSMF. Хотя для линии с однородными пролётами на основе волокна SSMF и линии с комбинированными пролётами произведение коэффициента нелинейности на нелинейную длину одинаково, коэффициент дисперсии для линии с однородными пролётами меньше, чем для линии с комбинированными пролётами. Это обусловлено большей скоростью накопления дисперсии и быстрым дисперсионным расплыванием импульсов. Из рисунка 2 видно, что с помощью описанной модели удалось получить хорошее качественное и количественное совпадение результатов.

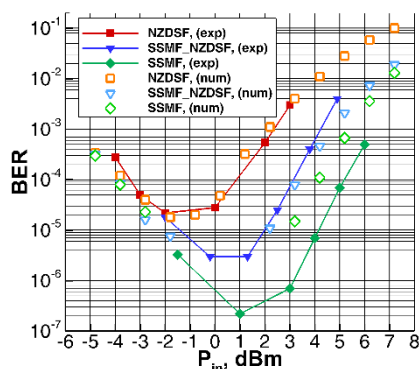


Рис. 2. Зависимость коэффициента ошибки от средней канальной мощности вводимого в пролёт излучения для линии протяжённостью 1200 км.

Получив совпадение результатов численных и лабораторных экспериментов для линии 1200 км, были выполнены численные расчёты максимальной дальности передачи для линий без дополнительной оптической компенсации дисперсии (рис. 1(a) и 1(b)). В расчётах максимальная дальность передачи определялась как максимальная дальность, при которой коэффициент ошибки меньше уровня $2 \cdot 10^{-2}$. На рисунке 3 показана зависимость дальности от средней канальной мощности сигнала, вводимого в

пролёт, учитывая, что дисперсия полностью компенсируется на приёмнике с помощью цифровой обработки сигнала. Наибольшая дальность передачи, около 20000 км, соответствует линии на основе волокна ULA с большой эффективной площадью моды и малой нелинейностью, тогда как для линии на основе волокна ULL с малыми потерями максимальная дальность составляет 14000 км. В отличие от результатов для линии длиной 1200 км, максимальная дальность передачи для линии с однородными пролётами SSMF и линии с комбинированными пролётами SSMF-NZDSF оказалась практически одинаковой, 9100 и 8500 км соответственно, а оптимальная мощность сигнала отличается меньше чем на 0.3 дБм. Линия на основе волокна NZDSF предсказуемо демонстрирует самую короткую протяжённость 4700 км вследствие большого коэффициента нелинейности и относительно высоких потерь. Стоит отметить, что при ограниченной величине электронной компенсации дисперсии (70 нс/нм) лишь линия с комбинированными пролётами обеспечивает значительное увеличение максимальной дальности до 6800 км без использования компенсаторов дисперсии в точках периодического усиления сигнала.

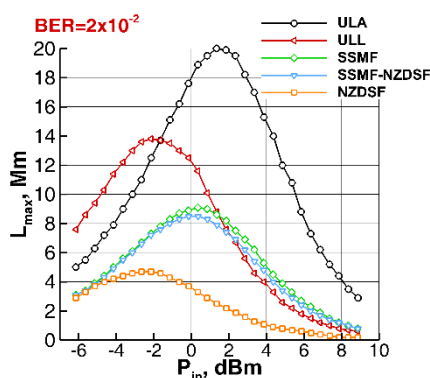


Рис.3. Зависимость максимальной дальности линии от средней канальной мощности вводимого в пролёт излучения для линий с полной электронной компенсацией дисперсии.

Далее, были исследованы линии, в которых частичная оптическая компенсация дисперсии была реализована с помощью использования дисперсионно-компенсирующих волокон DCF в точках периодического усиления сигнала (рис. 1(с)). Для каждой линии длина DCF выбиралась таким образом, чтобы средняя дисперсия пролёта составляла 10 пс/нм/км. Мощность вводимого в DCF излучения была установлена на уровне -10 дБм для минимизации нелинейных искажений. Как видно из рисунка 4, максимальная дальность для волокон ULA, ULL и SSMF уменьшилась до 13300, 10700 и 7500 км соответственно. Рассчитанное уменьшение дальности передачи за счёт потерь в DCF составило 5800, 2200 и 1100 км соответственно, тогда как оставшееся сокращение дальности обусловлено нелинейностями DCF. Стоит отметить, что для традиционных приёмников с ограниченной величиной электронной компенсации дисперсии (70 нс/нм) максимальная дальность для описанных линий с DCF составляет 7000 км для всех типов волокон.

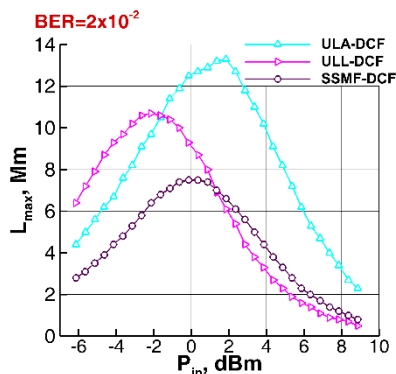


Рис.4. Зависимость максимальной дальности линии от средней канальной мощности вводимого в пролёт излучения для линий с частичной оптической компенсацией дисперсии.

Литература:

[1] Richardson D J 2010 Science 330 327-28

[2] Essiambre R J, Tkach R W and Ryf R 2013 Optical Fiber Telecommunications VIB ed I Kaminow, T Li

- and A E Willner (Waltham, MA: Elsevier Inc.) pp 1-37
- [3] Naji A W et al. 2007 Laser Phys. Lett. 7 145-8
 - [4] Redyuk A A et al. 2011 Quantum Electron. 41 929-33
 - [5] Gurkin N V et al. 2013 Quantum Electron. 43 546-49
 - [6] Gurkin N V et al. 2013 Quantum Electron. 43 550-53
 - [7] Gainov V V et al. 2013 Laser Phys. Lett. 10 075107
 - [8] Gurkin N V et al 2014 Laser Phys. Lett. 11 095103
 - [9] Gainov V et al. 2014 Opt. Express 22 22308-13
 - [10] Sinkin O V et al. 2012 Proc. Optical Fiber Communication Conf. (Los Angeles) p OTu1A.2
 - [11] Vacondio F et al. 2011 Proc. of ECOC (Geneva) p We.7.B.1
 - [12] Torrenge E et al. 2011 Proc. of ECOC (Geneva) p We.7.B.2
 - [13] Poggiolini P 2012 Proc. of ECOC (Amsterdam) p Th.2.G.1
 - [14] Zhang G et al. 2012 Proc. Optical Fiber Communication Conf. (Los Angeles) p PDP5D.4
 - [15] Xia T J and Wellbrock G A 2013 Optical Fiber Telecommunications VIB ed I Kaminow, T Li and A E Willner (Waltham, MA: Elsevier Inc.) pp 45-75
 - [16] Savory S J 2008 Opt. Express 16 804-17
 - [17] Agrawal G P 2001 Nonlinear Fiber Optics (New York: Academic Press) p 467

Эффект от использования кластера в достижении целей работы

Использование кластера при выполнении численных расчётов является важной составляющей для достижения основных целей данной работы.

Во-первых, при численном моделировании шумов спонтанной эмиссии, возникающих в волоконно-оптических линиях связи, используется стохастическая модель белого Гауссова шума. Помимо этого, формирование начальных последовательностей битов также осуществляется с помощью генератора случайных чисел. В связи с этим, для достижения статистически достоверных результатов необходимо осуществлять усреднение результатов по многим численным расчётам с разной реализацией случайных шумов и начальных последовательностей битов. Для этого необходимо осуществлять множество параллельно исполняющихся расчётов с разными начальными данными, результаты которых после завершения счёта централизованно обрабатываются. Если учесть, что в данной работе усреднения проводились по 10 реализациям начальных данных, то можно сделать приблизительную оценку, что использование кластера позволило в 10 раз сократить время численных расчётов по сравнению с использованием персонального компьютера.

Во-вторых, в рамках данной работы приходилось осуществлять множество типовых расчётов для разных значений средней мощности сигнала. Если точнее, расчёты проводились для диапазона мощностей от -6 до 9 дБм с шагом 0.5 дБм. Таким образом, для каждой конфигурации линии для каждого типа волокна необходимо было выполнить порядка 30 «одинаковых» расчёта с различными начальными данными. Если бы такие расчёты выполнялись на персональном компьютере, это потребовало бы примерно в 30 раз больше времени, чем при расчётах на нескольких узлах кластера.

Таким образом, при приблизительной оценке использование кластера позволило сократить время, затраченное на численные расчёты, в 300 раз. Если на кластере общее время, потраченное на все расчёты, составило около 2 недель, то при работе с персональным компьютером на это потребовалось бы 12 лет.

Перечень публикаций, содержащих результаты работы

Редюк А.А., Наний О.Е., Трещиков В.Н., Юшко О.В., Федорук М.П., “Численное моделирование действующих экспериментальных DWDM линий связи с канальной скоростью 100 Гбит/с”, материалы шестого Российского семинара по волоконным лазерам, Новосибирск, с. 102, 14-18 апреля 2014 г.

Yushko O.V., Nanii O.E., Redyuk A.A., Treshikov V.N., Fedoruk M.P. “System Performance of Long-Haul 100G DP-QPSK DWDM Transmission over Hybrid SSMF-NZDSF Spans,” Quantum Electronics, 2015 (IF Thomson Reuters 0.886)

Redyuk A.A., Nanii O.E., Treshchikov V.N., Mikhailov V., Fedoruk M.P. “100 Gb/s coherent DWDM system reach extension beyond the limit of electronic dispersion compensation using optical dispersion management,” Laser Physics Letters, 2015 (IF Thomson Reuters 2.964)

Ваши впечатления от работы вычислительной системы и деятельности ИВЦ НГУ, а также Ваши предложения по их совершенствованию

Впечатления от работы системы положительные, всю необходимую информацию можно найти на актуальном сайте ИВЦ НГУ. Предложений по совершенствованию работы системы пока нет.