

Влияние DWDM-технологии на надежность приема информации в оптоволоконных телекоммуникационных системах

К. М. Гуралюк, А. В. Поляков

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, e-mail: ks.guralyuk@yandex.ru

Проведены исследования влияния нелинейных эффектов на вероятность ошибки (*BER*) в DWDM-системах передачи информации в зависимости от температуры. Установлено, что совместное воздействие фазовой самомодуляции и четырехволнового смешения с учетом межсимвольной интерференции приводит к увеличению *BER* больше требуемой $BER=10^{-9}$ во всем исследуемом диапазоне для одномодового оптоволокна с ненулевой смещенной дисперсией и хроматической дисперсии 2 пс/нм·км. Для стандартного одномодового оптоволокна с коэффициентом хроматической дисперсии 17 пс/нм·км показано, что влияние четырехволнового смешения существенно снижается и увеличивает *BER* только в 1,2 раза. Во всех случаях наблюдалась температура, при которой возникают минимальные значения *BER*.

Ключевые слова: DWDM-технологии; оптоволоконная линия связи; вероятность ошибки; фазовая самомодуляция; четырехволновое смешение, межсимвольная интерференция.

Influence of DWDM Technology on the Reliability of Information Reception in Optical Fiber Telecommunication Systems

K. M. Guraliuk, A. V. Polyakov

Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: ks.guralyuk@yandex.ru

Research has been carried out on the impact of nonlinear effects on the bit error rate (*BER*) in DWDM transmission systems as a function of temperature. The results show that the combined action of self-phase modulation and four-wave mixing, with intersymbol interference taken into account, causes the *BER* to exceed the target level of 10^{-9} across the entire studied range for single-mode optical fiber with nonzero dispersion-shifted characteristics and a chromatic dispersion of 2 ps/nm·km. In the case of standard single-mode optical fiber with a chromatic dispersion coefficient of 17 ps/nm·km, the influence of four-wave mixing is substantially reduced and results in only a 1.2-fold increase in *BER*. In all scenarios, a specific temperature was identified at which the *BER* attains its minimum value.

Keywords: DWDM technology; fiber optic communication line; bit error rate; self-phase modulation; four-wave mixing; intersymbol interference.

Введение

Волоконно-оптические линии связи являются основой современных телекоммуникационных систем благодаря высокой пропускной способности, низким потерям и устойчивости к электромагнитным воздействиям. Эти преимущества делают их незаменимыми при организации высокоскоростных каналов передачи данных на большие расстояния.

Одной из ключевых технологий, обеспечивающих рост эффективности использования спектрального ресурса оптического волокна, является DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) – плотное мультиплексирование с разделением по длине волны. Данная технология позволяет мультиплексировать десятки и

сотни оптических каналов в одном световоде, существенно повышая общую пропускную способность системы. Однако увеличение числа каналов и плотность их спектрального расположения сопровождаются ростом влияния нелинейных эффектов в волокне, в частности четырёхволнового смешения и фазовой самомодуляции, а также мешающих сигналов, возникающих вследствие межсимвольной интерференции. Эти факторы могут приводить к искажению принимаемых информационных импульсов и снижению надежности приема.

При проектировании DWDM-систем особое внимание уделяется обеспечению требуемой вероятности битовой ошибки (*BER*), которая зависит не только от параметров волокна и уровня нелинейных искажений, но и от температурных условий работы приёмного оборудования. Совместное воздействие температурных факторов, нелинейных эффектов и межсимвольной интерференции способно существенно ухудшать качество приема информации [1].

В связи с этим возникает необходимость проведения численного моделирования, направленного на исследование влияния нелинейных эффектов и межсимвольной интерференции на вероятность ошибки в DWDM-системах для различных типов волоконных световодов.

Результаты численного моделирования

Для анализа выбрана наиболее часто встречающаяся для магистральных быстродействующих ВОЛС архитектура типа «точка-точка» со спектральным мультиплексированием информационных каналов и периодическим усилением оптических сигналов с помощью волоконных эрбиевых усилителей. В качестве волоконного световода использовалось кварцевое одномодовое оптоволокно. Для сравнения были выбраны одномодовое оптоволокно с ненулевой смещенной дисперсией с коэффициентом хроматической дисперсии 2 пс/нм·км и оптическими потерями 0,22 дБ/км, а также стандартное одномодовое волокно с дисперсией 17 пс/нм·км. Рабочий диапазон длин волн составлял 1530–1565 нм, скорость передачи информации 10 Гбит/с на один информационный канал, формат модуляции – амплитудный с возвращением к нулю (RZ). Согласно [2], максимальное расстояние между оптическими усилителями, обеспечивающие вероятность ошибки не более 10^{-9} , составляет 90 км. Кроме того, в [3] показано, что совместное влияние хроматической дисперсии и фазовой самомодуляции (ФСМ) приводит к первоначальному уменьшению и последующему увеличению длительности информационных импульсов в процессе распространения по волокну. В этом случае, если ограничиться условием, что длительность оптического импульса не превышает $0,6T_i$ (T_i – тактовый интервал), когда значение межсимвольной интерференции составляет 1–1,5 дБ, количество оптоволоконных секций равняется 5, после чего необходимо использовать регенератор, восстанавливающий импульсы не только по амплитуде, но и по длительности и форме.

Для систем с плотным спектральным уплотнением каналов (DWDM) особую роль играет четырехволновое смешение (FWM – Four-Wave Mixing). Его возникновение и степень выраженности зависят в основном от межканальных интервалов, мощности подаваемого сигнала и удельной дисперсии оптического волокна, тогда как скорость передачи не является определяющим фактором.

Мощности мешающего сигнала на частоте f_{ijk} проводится по формуле:

$$P_{ijk} = n_{ijk} \left(\frac{2\pi k_n d_{ijk} L_e}{3\lambda A_{\text{эфф}}} \right)^2 P_i P_j P_k 10^{-0,1\alpha L}, \quad (1)$$

где P_i, P_j, P_k – мощности сигналов на входе волокна с круговыми частотами w_i, w_j и w_k , равны значению входной мощности (P_0); $P_i = P_j = P_k = P_{out}$; коэффициент вырождения $d_{ijk} = 6$; коэффициент вырождения d_{ijk} , который равен 3, если $i = j$ (вырожденное FWM) и $d_{ijk} = 6$ при $i \neq j$; $A_{\text{эфф}}$ – эффективная площадь моды, $A_{\text{эфф}} = 50 \text{ мкм}^2$; k_n – коэффициент нелинейности показателя преломления, $k_n = 3,2 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2/\text{Вт}$.

Если определена мощность помехи, создаваемой невырожденным FWM P_{1ijk} , и мощность помехи, создаваемой вырожденным FWM P_{2ijk} , то общая мощность шума P_{FWM} в оптическом канале с частотой f_{ijk} рассчитывается по формуле:

$$P_{FWM} = \sqrt{m_1 \cdot P_{1ijk}^2 + m_2 \cdot P_{2ijk}^2}, \quad (2)$$

где m_1 и m_2 – число мешающих сигналов, появившихся в результате невырожденного и вырожденного FWM.

Для расчетов использовали стандартную для DWDM-систем спектральную сетку 100 ГГц (0,8 нм) между информационными каналами с одинаковой входной мощностью всех оптических импульсов 2 мВт. Используемые волоконные эрбиевые усилители имеют полосу усиления 35 нм, в этом случае возможно в одном волокне организовать 32 информационных канала и 8 вспомогательных служебных. Влияние четырехволнового смещения рассматривали для сигналов, соответствующих середине диапазона количества информационных каналов, когда число комбинаций шумовых сигналов максимальное.

На рис. 1, а представлены результаты моделирования вероятности ошибки от температуры для одномодового оптоволокна с ненулевой смещенной дисперсией с коэффициентом хроматической дисперсии 2 пс/нм·км при учете влияния только фазовой самомодуляции, а также при совместном учете фазовой самомодуляции, четырехволнового смещения и межсимвольной интерференции.

Согласно стандартам Международного союза электросвязи (ITU-T), требуемый уровень вероятности битовой ошибки BER не должен превышать 10^{-9} . Из графика следует, что зависимость BER от температуры имеет минимум, при этом учет совместного влияния фазовой самомодуляции, четырехволнового смещения и межсимвольной интерференции существенно влияет на величину BER при различных температурах и минимум BER смещается в сторону комнатных температур. Учет совместного влияния нелинейных эффектов ухудшает вероятность ошибки на 3 порядка.

На рис. 1, б представлены результаты моделирования вероятности ошибки от температуры для стандартного одномодового оптоволокна с коэффициентом хроматической дисперсии 17 пс/нм·км при учете влияния только фазовой самомодуляции, а также при совместном учете фазовой самомодуляции, четырехволнового смещения и межсимвольной интерференции.

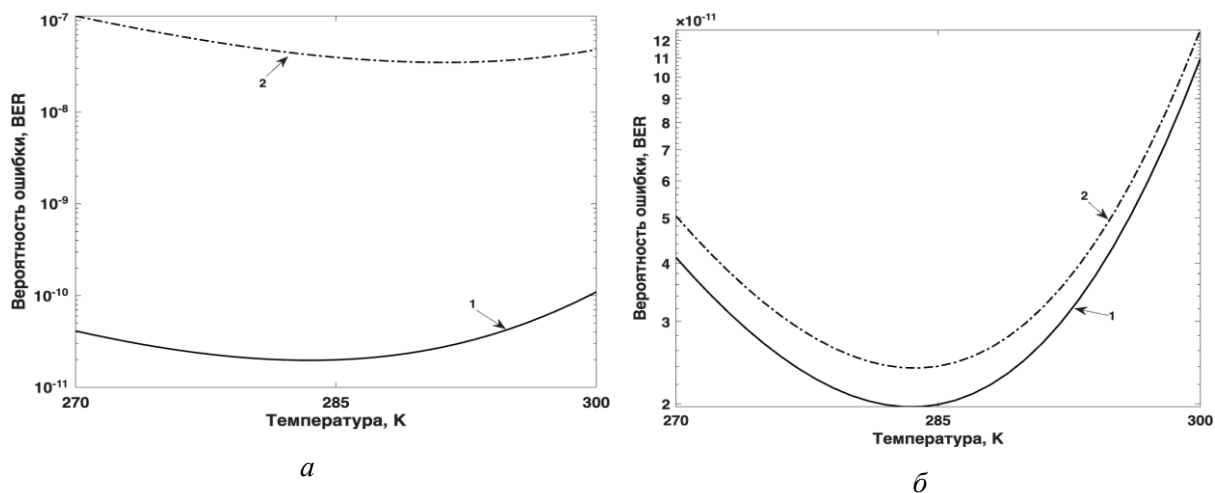


Рис. 1. Зависимость вероятности ошибки ВОЛС от температуры с учетом влияния ФСМ (линии 1) и с учетом влияния ФСМ, четырехволнового смешения и межсимвольной интерференции (линии 2):

a – оптоволокно с ненулевой смещенной дисперсией;

б – стандартное одномодовое оптоволокно

Из графиков следует, что температура, на которой наблюдается минимум вероятности ошибки, не изменяется, однако учет совместного влияния нелинейных эффектов ухудшает вероятность ошибки в 1,2 раза.

Заключение

Из результатов численного моделирования установлено, что совместное влияние нелинейных эффектов, таких как фазовая самомодуляция, четырёхволновое смешение и межсимвольная интерференция, увеличивает значения *BER* во всём исследуемом диапазоне для одномодового оптоволокна с ненулевой смещённой дисперсией и коэффициентом хроматической дисперсии 2 пс/нм·км на три порядка. Величина *BER* не должна превышать 10^{-9} во всем температурном диапазоне от 270 К до 300 К. Показано, что данное условие выполняется для стандартного одномодового оптоволокна с коэффициентом хроматической дисперсии 17 пс/нм·км и учет влияния нелинейных эффектов не изменяет температуру, на которой наблюдается минимум вероятности ошибки, однако увеличивает вероятность ошибки в 1,2 раза.

Библиографические ссылки

1. Гуралюк К. М., Поляков А. В. Влияние нелинейных эффектов на вероятность ошибки в протяженных оптоволоконных информационных системах // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики, аэрокосмических технологий и физики конденсированного состояния: Материалы VIII межд. науч.-практ. конф., Минск, 22–23 мая 2025г. / М-во образования Респ. Беларусь, НИУ «Ин-т приклад. физ. проблем им. А. Н. Севченко Беларус. гос. ун-та; редкол.: П. В. Кучинский (гл. ред.) [и др.]. Минск, 2025. С. 22–24.
2. Поляков А. В., Гуралюк К. М. Влияние температуры на вероятность ошибки в протяженных оптоволоконных информационных системах // Квантовая электроника: Материалы XIV межд. научно-технической конф., Минск, 21–23 ноября 2023г. / БГУ, НИИПФП им. А. Н. Севченко. Минск, 2023. С. 295–297.
3. Polyakov A. V. Simulation of fiber-optic buffer loop memory with all-optical 2R regeneration // Optical Memory and Neural Networks. 2020. Vol. 29, iss. 2. P. 100–109.