

Исследование влияния четырехволнового смещения на качество передачи данных в системе со спектральным уплотнением

Н.В. Яковлев
Санкт-Петербургский
Государственный университет
Телекоммуникаций им. проф.
М.А.Бонч-Бруевича
Санкт-Петербург, Россия

А.И. Исупов
Санкт-Петербургский
Государственный университет
Телекоммуникаций им. проф.
М.А.Бонч-Бруевича
Санкт-Петербург, Россия

Е.И. Андреева
Санкт-Петербургский
Государственный университет
Телекоммуникаций им. проф.
М.А.Бонч-Бруевича
Санкт-Петербург, Россия
helena-dima@mail.ru

Аннотация—Проведено исследование эффекта четырехволнового смещения в системе передачи данных со спектральным уплотнением. Смоделирован метод уменьшения негативного влияния этого эффекта на качество передачи данных с применением пассивной спектральной полосы.

Ключевые слова— волоконно-оптические линии связи, спектральное уплотнение, четырехволновое смещение, нелинейные эффекты.

1. ВВЕДЕНИЕ

Увеличение информационной емкости волоконно-оптических линий связи предполагает повышение входной мощности символьных импульсов, повышение скорости передачи данных, использование спектрального уплотнения каналов [1-4]. В таких системах на качество передачи данных существенное влияние оказывают нелинейные эффекты. В системах со спектральным уплотнением наибольшее влияние оказывает эффект четырехволнового смещения (FWM - Four-Photon Mixing) [1-4]. При параметрических процессах, одним из которых является четырехволновое смещение, световод выступает в качестве пассивной среды, в которой оптические волны взаимодействуют через нелинейный отклик возбуждаемых ими электронами внешних оболочек. Известно, что этот эффект возникает при взаимодействии соседних каналов, существенно зависит от спектральной разнесенности каналов в системе, зависит от полной оптической мощности в соседних взаимодействующих каналах, возрастает в световодах со смещенной дисперсией.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для волоконно-оптических линий связи нежелательными являются продукты четырехволнового смещения:

$$f_{i,j,k} = f_i + f_j - f_k, \quad (1)$$

$$f_{2i,k} = 2f_i - f_k, \quad (2)$$

где f_i, f_j, f_k – центральные частоты рабочих оптических каналов. Для N -канальной системы индексы i, j, k принимают любые значения от 1 до N , что приводит к генерации $(N^3 - N^2)/2$ продуктов четырехволнового смещения.

Количество нежелательных спектральных компонент, попадающих в заданный спектральный канал с индексом m , где $m = 1 \dots N$, можно оценить как [2, 3]:

$$N_{(f_i+f_j-f_k)}(m,N) = m \cdot (N-m+1)/2 + [(N-3)^2-5]/4 - [1-(-1)^N(-1)^{N+m}]/8. \quad (3)$$

$$N_{(2f_i-f_k)}(m,N) = [N-2-0,5 \cdot (N-2-0,5 \cdot (1-(-1)^N) \cdot (-1)^m)]. \quad (4)$$

$$N_{\Sigma} = N_{(f_i+f_j-f_k)} + N_{(2f_i-f_k)}. \quad (5)$$

Как показывает численный анализ и результаты моделирования в программе OptiSystem, наибольшее количество дополнительных комбинационных частот попадает в центральные каналы рабочего спектрального диапазона (рис.1). Количество комбинационных частот – продуктов четырехволнового смещения быстро нарастает с увеличением числа N спектральных каналов в системе. В результате отношение сигнал-шум может ухудшаться.

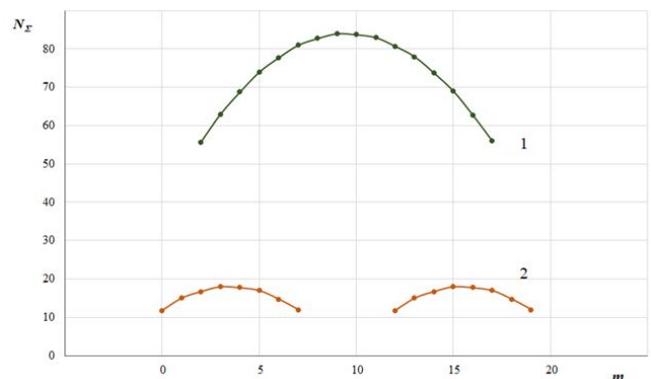


Рис. 1. Уменьшение числа продуктов четырехволнового смещения при использовании пассивной полосы: 1 – распределение комбинационных частот при общем числе каналов $N = 16$, 2 – распределение комбинационных частот в рабочих каналах с $N = 8$ при использовании пассивной полосы шириной 4 спектральных канала

Моделирование проводилось в программе OptiSystem. В качестве генератора кодовой последовательности использовался источник гауссовских импульсов. Сигналы от отдельных генераторов объединялись с помощью мультиплексоров в один волоконный световод. Для разделения влияния отдельных факторов рассматривались случаи волоконного световода с потерями и без потерь, с дисперсией от 2 до 20 пс/(нм·км), соответствующую световоду с ненулевой смещенной дисперсией и стандартному световоду.

Моделирование проводилось в несколько этапов. На первом этапе рассматривалась система с высоким спектральным разрешением. Продемонстрировано, что уменьшение негативного влияния четырехволнового смещения может быть достигнуто за счет использования пассивной спектральной полосы [2-3]. Для этого один восьмиканальный поток данных разбивался на два четырехканальных потока, разнесенные пассивным спектральным интервалом. На рис. 2(а) показан спектр входного сигнала. На рис. 2(б) представлен спектр сигнала с набором комбинационных частот – продуктов четырехволнового смещения. Как видно из рис. 2(в), мощность этих компонентов быстро спадает с удалением от рабочих частот и не попадает в соседний рабочий спектральный диапазон. Следовательно, для уменьшения негативного влияния четырехволнового смещения может быть использован метод разделения рабочего спектра системы пассивной спектральной полосой.

На втором этапе моделировались многоканальные системы с малым шагом спектрального разнесения. В ходе моделирования показано, при передаче данных со спектральным разнесением каналов 100 ГГц по стандартному волоконному световоду (standard single mode fiber, SSMF) с дисперсией $D = 16,75$ пс/нм/км при уровне потерь 0,2 дБ/км уровень комбинационных частот составлял около -40 дБ относительно передаваемого оптического сигнала. Таким образом показано, что влияние эффекта четырехволнового смещения в стандартном световоде невелико. При использовании световода со смещенной дисперсией (dispersion shifted fiber, DSF) при $D = 2$ пс/нм/км эффект четырехволнового смещения наблюдался уже при значительно меньших уровнях мощности оптического сигнала на входе в линию. Уровень комбинационных частот составлял около -20 дБ относительно передаваемого оптического сигнала. Таким образом показано, что в волоконных световодах со смещенной дисперсией комбинационные частоты, возникающие в результате эффекта четырехволнового смещения, создают серьезные помехи. Использование пассивной спектральной полосы значительно снижает негативное влияние эффекта четырехволнового смещения.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено численное моделирование волоконно-оптической системы передачи данных со спектральным уплотнением. Показано, что при построении системы с пассивной спектральной полосой количество комбинационных частот – продуктов четырехволнового смещения может быть существенно уменьшено. Таким образом может быть повышено качество передачи данных в системах со спектральным уплотнением каналов.

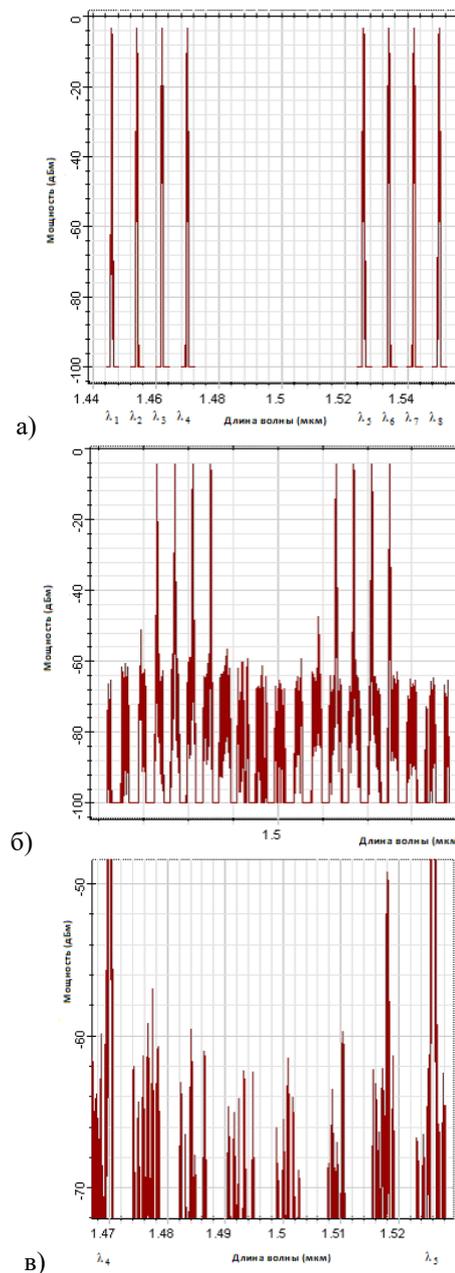


Рис. 2. Спектр сигнала на входе (а) и на выходе (б) линии длиной 20 км и фрагмент спектра между рабочими полосами частот (в)

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Агравал, Г. Нелинейная волоконная оптика. – М.: Мир, 1996. – 323 с.
- [2] Вардамян, В.А. Исследование распределения продуктов четырехволнового смешивания в ВОСП с ЧРК / В.А. Вардамян // Вестник СибГУТИ. – 2016. – № 2 – С.78-84.
- [3] Вардамян, В.А. Исследование помех от четырехволнового смещения на спектрально разделенные каналы в пассивных оптических сетях доступа / В.А. Вардамян // Автотметрия. – 2017. – Т. 51, № 1. – С. 63-72.
- [4] Yakovlev, N.V. Effect of the FWM and SRS on the fiber optics wavelength multiplexing system parameters / N.V. Yakovlev, A.V. Bykov, E.I. Andreeva // SPb Open Proc. – 2021.