

ВЫЧИСЛЕНИЕ МОЩНОСТИ ЧЕТЫРЕХВОЛНОВОГО СМЕШИВАНИЯ ВОЗНИКАЮЩЕГО В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ С ВОЛНОВЫМ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ

Для передачи больших потоков информации (1 Гбит/с и выше) по оптическому волокну на расстоянии до сотен километров и выше требуется решение множества задач. Главными препятствиями на пути построения протяженных сегментов оптических линий связи без регенераторов являются: дисперсия распространяемого по волокну оптического сигнала, влияние нелинейных эффектов в мультиплексной оптической линии, вносимые шумы и потери. В локальных и особенно протяженных сетях емкости магистральных линий связи обычно значительно превышают емкости передач отдельных информационных пакетов. Это делается с целью одновременной передачи множества таких информационных пакетов. Сами приложения могут иметь разную природу. Например, это может быть передача постоянного битового потока или передача файлов данных. С целью повышения эффективности передающей среды (носителя) и ее адаптации под множество разнородных приложений применяется передача одновременно сразу нескольких информационных сигналов в одном носителе – мультиплексирование. [1]. При частотном мультиплексировании (FDM – frequency division multiplexing) каждому сигналу отводится определенная доля всей частотной полосы носителя, так что на одном носителе существует одновременно сразу несколько сигналов. Частотное мультиплексирование распространено в системах беспроводной радиосвязи, в мобильных телефонных системах, в абонентских телевизионных системах, включая кабельное телевидение и телефонию. Каналы, представленные в мультиплексном сигнале могут быть как аналоговыми, так и цифровыми. Разновидностью FDM является волновое мультиплексирование WDM (wavelength division multiplexing) [1], применяемое в волоконно-оптических системах передачи информации. Преимущественно используется область спектра от 1,3 мкм (230 ТГц) до 166 мкм (188 ТГц). Для плотного волнового мультиплексирования используется область спектра 1530-1560 нм. При этом применяются различные схемы спектрального размещения каналов в волокне (рис. 1). На рисунке показано размещение каналов с различным расстоянием между каналами для двух синхронных транспортных модулей 64-го и 16-го уровней (Synchronous Transport Module of level 64 and 16, SDH-64, SDH-16) иерархии SDH (Synchronous Digital Hierarchy, синхронная цифровая иерархия; европейский стандарт для волоконно-оптических линий распределенных сетей). С уменьшением межканальных интервалов возрастает влияние эффекта четырехволнового смешивания, что начинает ограничивать максимальную длину межрегенерационной линии (линии на основе только оптических усилителей). Как видно из рисунка, мультиплексирование каналов STM-64 с интервалом 50 ГГц не допустимо, поскольку тогда возникает перекрытие спектров соседних каналов [2]. Только при наличии меньшей скорости передачи в расчете на канал (STM-4 и ниже), перекрытие спектров не возникает.

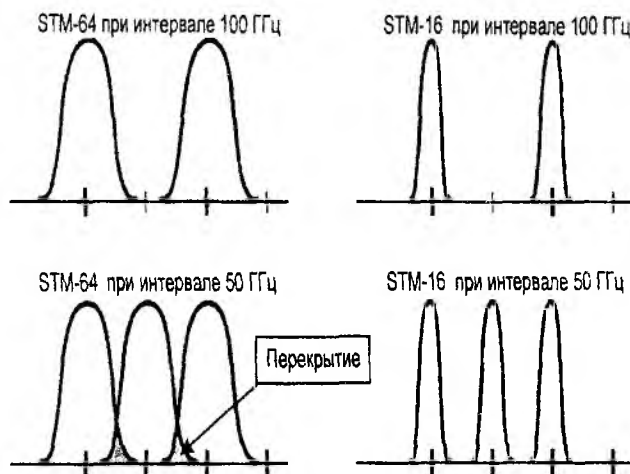


Рис. 1

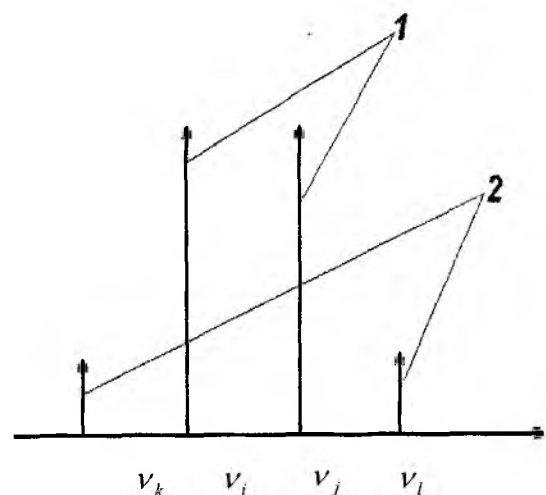


Рис. 2

Природа нелинейного эффекта четырехволнового смешивания (four-wave mixing, FWM) связана с наличием слабой зависимости показателя преломления волокна от интенсивности распространяемого по нему света, в результате чего из двух длин волн с частотами ν_i, ν_j (1 на рис. 2) появляется две новые волны с частотами ν_k и ν_l (2 на рис. 2), причем, $\nu_i + \nu_j = \nu_k + \nu_l$, как того требует закон сохранения энергии. При попадании новых волн в спектральные области существующих каналов возникают поперечные помехи между каналами. Влияние поперечных помех из-за FWM увеличивается с приближением хроматической дисперсии к нулю и максимально в окрестности точки нулевой дисперсии. Наиболее сильно подвержено влиянию FWM волокно с нулевой смещенной дисперсией DSF (dispersion-shifted fiber). Длина волны нулевой дисперсии у этого волокна попадает в рабочую область усиления EDFA (erbium doped fiber amplifier, усилитель на волокне, легированном эрбием).

Вследствие того, что эффект четырехволнового смешивания оказывает влияние на качество передаваемой информации, при проектировании волоконно-оптических линий связи необходимо учитывать этот эффект.

В данной работе проанализированы способы вычисления мощности четырехволнового смешивания, возникающего в волоконно-оптических линиях передачи. Приведенные ниже соотношения можно использовать для поиска путей уменьшения влияния этого эффекта на стадии проектирования.

Для того, чтобы определить мощность четырехволнового смешивания на частоте $f_F = f_p + f_q - f_r$ (f_p, f_q и f_r – частоты трех взаимодействующих сигналов), можно воспользоваться следующей формулой [1]:

$$P_g = \frac{1024\pi^6}{n^4 \lambda^2 c^2} \left(\frac{K\chi L_{eff}}{A_{eff}} \right) P_i P_j P_k e^{-\alpha L} \eta, \quad (1)$$

где n – показатель преломления материала сердцевины волокна; λ – длина волны излучения; c – скорость света в вакууме; P_i, P_j, P_k – входные мощности каналов; L_{eff} – эффективная длина волокна, определяемая как

$$L_{eff} = \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha L}), \quad (2)$$

где α – потери в волокне (при расчете взято значение $\alpha = 0,23$ дБм/км); A_{eff} – эффективный диаметр волокна; K – безразмерный коэффициент ($K = 3$ для двухчастотного и $K = 6$ для трехчастотного FWM сигнала); χ [м²/Вт] – нелинейная восприимчивость. Нелинейная восприимчивость может быть рассчитана по следующей формуле

$$\chi = \frac{cn^2}{480\pi^2} n_2. \quad (3)$$

Эффективность четырехволнового смешивания η зависит от потерь в волокне и его длины:

$$\eta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta^2} \left(1 + \frac{4e^{-\alpha L} \sin^2(\Delta\beta L/2)}{(1 - e^{-\alpha L})^2} \right). \quad (4)$$

Величина $\Delta\beta$ в формуле (4) – это разность постоянных распространения различных волн вследствие дисперсии. Для двухчастотного сигнала при промежутке между соседними каналами Δf эта разность равна

$$\Delta\beta = \beta_g + \beta_k - \beta_j - \beta_i = \frac{2\pi\lambda^2}{c} \Delta f^2 \left(D + \Delta f \frac{\lambda^2}{c} \frac{dD}{d\lambda} \right), \quad (5)$$

где дисперсия D и ее наклон $dD/d\lambda$ вычисляются на длине волны λ_k .

На рис. 3 представлен график зависимости мощности четырехволнового смешивания в зависимости от расстояния между соседними каналами и величины дисперсии волокна (величина дисперсии указана в пс/нм·км).

Как видно из приведенного графика, мощность четырехволнового смешивания значительно уменьшается как при увеличении расстояния между каналами, так и при увеличении значения дисперсии волокна. Однако, вследствие особенностей работы эрбиевых волоконных усилителей увеличивать расстояние между соседними каналами не целесообразно, т.к. при этом повышается уровень шумов вносимых такими усилителями и соотношение сигнал/шум значительно падает.

На рис. 4 приведена зависимость мощности четырехволнового смешивания от длины волокна и расстояния между соседними каналами.

Как видно из этого рисунка, величина мощности четырехволнового смешивания быстро растет с расстоянием и, достигнув некоторого значения, больше не увеличивается. Это связано с тем, что при большой длине волокна его эффективная длина стремится к величине $1/\alpha$ (см. (2)).

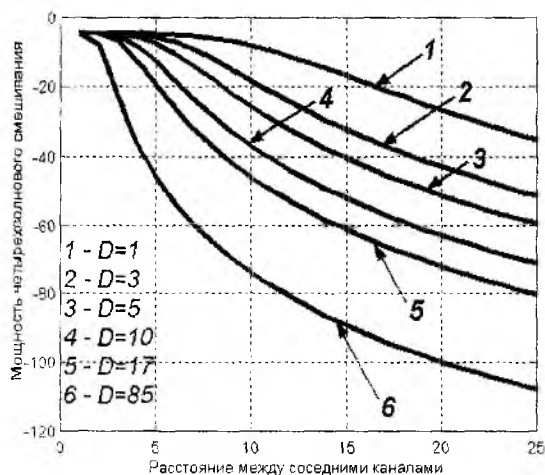


Рис. 3

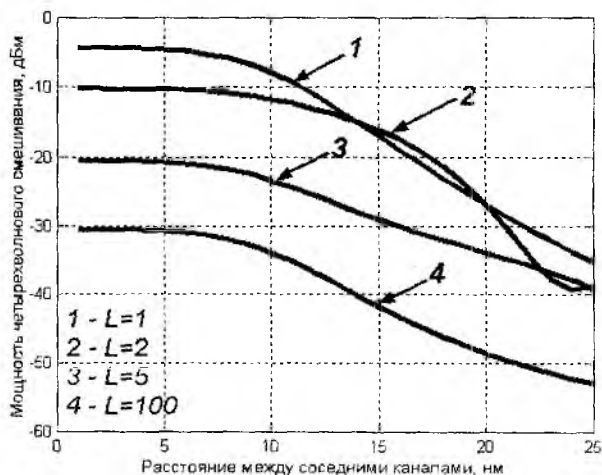


Рис. 4

Одним из способов уменьшения влияния эффекта четырехволнового смешивания является неравномерное размещение каналов в полосе пропускания волокна, т.е. расстояние между каналами не равнозначно. Вследствие этого генерируется большее число FWM сигналов, но их амплитуда при этом значительно меньше, чем амплитуда FWM сигналов, генерирующихся при равномерном размещении каналов. Это происходит вследствие того, что при равномерном размещении сигналов генерирующиеся сигналы имеют одинаковые частоты при разных сочетаниях i, j и k и, складываясь друг с другом, усиливаются, а при неравномерном размещении эти сигналы имеют различные частоты. Однако такое размещение каналов еще не стандартизировано, т.к. равномерное распределение каналов позволяет оптимизировать работу волновых конвертеров, перестраиваемых лазеров и других устройств полностью оптической сети, а также позволяет легче ее наращивать.

Еще один из методов значительного уменьшения дисперсионного эффекта и эффекта четырехволнового смешивания заключается в использовании волокна со смещенной дисперсией. В отличие от обычного одномодового волокна, точка нулевой дисперсии которого расположена вблизи 1,3 мкм, волокно со смещенной дисперсией имеет точку нулевой дисперсии вблизи 1,55 мкм, что способствует передаче сигнала с минимальными потерями и оптимальными режимами работы EDFA. Для уменьшения влияния на сигнал нелинейных эффектов применяют следующую схему: используют два различных типа волокна (рис. 5), одно из которых имеет положительную дисперсию, а другое — отрицательную [2]. На рисунке представлена конфигурация линии передачи при использовании такой схемы. Линия передачи состоит из нескольких секций, между которыми установлены волоконные усилители. Каждая из секций состоит из волокон с различным знаком дисперсии. Суммарная накопленная дисперсия является нулевой для некоторой длины волны после некоторого расстояния, пройденного сигналом в волокне, но величина абсолютной дисперсии не равна нулю в любой точке волокна. Результатом действия такой схемы является то, что общий эффект, обусловленный дисперсией, незначителен для одной длины волны и, что очень важно, это является причиной несоответствия фаз между каналами, что уничтожает эффекты четырехволнового смешивания.

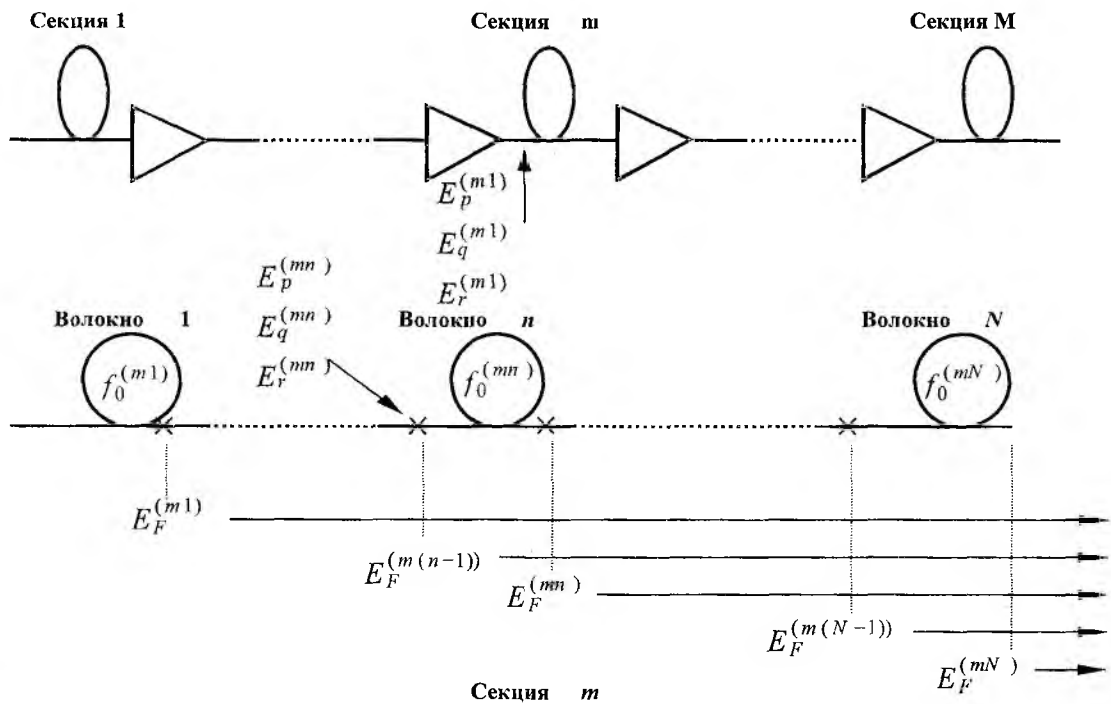


Рис. 5

При использовании такой схемы для вычисления мощности четырехволнового смешивания в конце передающей линии необходимо вычислять мощность в каждом отрезке волокна. В этом случае необходимо знать параметры каждого отрезка (длина отрезка, величина и знак дисперсии, коэффициент затухания). В уравнении для вычисления мощности четырехволнового смешивания необходимо суммировать генерирующиеся в каждом отрезке волокна паразитные сигналы [2]. Введем следующие обозначения: M – число секций; N – число волокон в одной секции; L_0 – длина одного волокна; $\beta_p^{(mn)}$ ($\beta_q^{(mn)}$, $\beta_r^{(mn)}$) – постоянная распространения для сигнала с частотой f_p (f_q , f_r) в n -ом волокне m -ой секции; $\beta_F^{(mn)}$ – постоянная распространения для сигнала с частотой генерируемого четырехволнового смешивания; $E_p^{(mn)}$ ($E_q^{(mn)}$, $E_r^{(mn)}$) – амплитуда оптического поля на частоте f_p (f_q , f_r); $E_F^{(mn)}$ – амплитуда оптического поля на частоте генерируемого четырехволнового смешивания; $\phi_p^{(m)} = \sum_{n=1}^N \beta_p^{(mn)} L_0$ ($\phi_q^{(m)} = \sum_{n=1}^N \beta_q^{(mn)} L_0$, $\phi_r^{(m)} = \sum_{n=1}^N \beta_r^{(mn)} L_0$) – фазы сигналов с частотами f_p (f_q , f_r) распространяющихся в m -ой секции; $\phi_F^{(m)} = \sum_{n=1}^N \beta_F^{(mn)} L_0$ – фаза сигнала с частотой генерируемого четырехволнового смешивания распространяющегося в m -ой секции.

Тогда можно записать уравнение для амплитуды сигнала возникающего в результате четырехволнового смешивания:

$$E_F^{(mn)} = k E_p^{(mn)} E_q^{(mn)} E_r^{(mn)} \exp \left[\left(-\frac{\alpha}{2} + i \beta_F^{(mn)} \right) L_0 \right] \times \frac{1 - \exp \left[\left(-\alpha + i \Delta \beta^{(mn)} \right) L_0 \right]}{\alpha - i \Delta \beta^{(mn)}}, \quad (6)$$

где $k = i \frac{(2\pi)^2}{n_0 \lambda} D \chi$.

Напряженность электрического поля сигналов, распространяющихся в оптическом волокне, вычисляется по формулам [2]:

$$E_p^{(mn)} = E_p^{(m1)} \exp \left[\sum_{j=1}^{n-1} \left(-\frac{\alpha}{2} + i\beta_p^{(mj)} \right) L_0 \right] = E_p^{(11)} \exp \left[i \sum_{k=1}^{m-1} \phi_p^{(k)} + \sum_{j=1}^{n-1} \left(-\frac{\alpha}{2} + i\beta_p^{(mj)} \right) L_0 \right], \quad (7a)$$

$$E_q^{(mn)} = E_q^{(11)} \exp \left[i \sum_{k=1}^{m-1} \phi_q^{(k)} + \sum_{j=1}^{n-1} \left(-\frac{\alpha}{2} + i\beta_q^{(mj)} \right) L_0 \right], \quad (7б)$$

$$E_r^{(mn)} = E_r^{(11)} \exp \left[i \sum_{k=1}^{m-1} \phi_r^{(k)} + \sum_{j=1}^{n-1} \left(-\frac{\alpha}{2} + i\beta_r^{(mj)} \right) L_0 \right]. \quad (7в)$$

Используя (7), перепишем (6) как:

$$E_F^{(mn)} = k E_p^{(11)} E_q^{(11)} E_r^{(11)} \exp \left[i \sum_{k=1}^{m-1} \left(\phi_F^{(k)} + \Delta\phi^{(k)} \right) \right] \times \exp \left[\sum_{j=1}^n \left(-\frac{\alpha}{2} + i\beta_F^{(mj)} \right) L_0 \right] \times \exp \left[\sum_{j=1}^{n-1} \left(-\alpha + i\Delta\beta^{(mj)} \right) L_0 \right] \times \frac{1 - \exp \left[\left(-\alpha + i\Delta\beta^{(mn)} \right) L_0 \right]}{\alpha - i\Delta\beta^{(mn)}}. \quad (8)$$

Пользуясь приведенной методикой можно рассчитать мощность (возведя вычисленные напряженности электрических полей распространяющихся сигналов в квадрат) четырехволнового смешивания, возникающую при любой конфигурации линии передачи.

Анализ этих соотношений показывает, что мощность четырехволнового смешивания напрямую зависит от напряженности электрического поля информационных сигналов (а значит и от их мощности), от набега фаз полученных при распространении сигнала по волокну, а также от длины волокна (незначительно, см. рис. 5) и величины затухания.

Исходя из вышеизложенного, перечислим основные мероприятия по уменьшению влияния эффекта четырехволнового смешивания:

- уменьшение интервалов между каналами (при этом необходимо принимать во внимание, что в волокне DSF сильные поперечные помехи в каналах могут возникать из-за FWM по мере приближения к точке нулевой дисперсии);
- стремление не делать очень большой мощность вводимого в волокно излучения;
- использование двух различных типов волокон, из которых одно волокно имеет положительную дисперсию, а другое – отрицательную.

Список литературы: 1. Убайдуллаев Р. Р. Волоконно-оптические сети. М.: Эко-Трендс. 271с. 2. *Kyo Inoue and Hiroshi Toba*. "Fiber Four-Wave Mixing in Multi-Amplifier Systems with Nonuniform Chromatic Dispersion". J. Lightwave Technol. 1995. Vol. 13. P. 88-93. 3. *Shibata N., Braun R. P., Waarts R. G.* Phase-matching dependence of efficiency of wave generation through four-wave mixing in a single-mode optical fiber// IEEE J. Quantum Electron. 1987. Vol. QE-23. P. 1205-1211.

Харьковский государственный технический университет радиотехники

Поступила в редколлегию 4.01.2001