

В. К. КОВАЛЬЧУК, Ю. Б. НЕСЕН, Т. Г. ШЕВЧЕНКО

РАСЧЕТ КОЛИЧЕСТВА ПРОДУКТОВ ЧЕТЫРЕХВОЛНОВОГО СМЕШИВАНИЯ В СИСТЕМАХ С ПЛОТНЫМ ОПТИЧЕСКИМ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ

Внедрение волоконно-оптических систем передач (ВОСП) с плотным волновым мультиплексированием (Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM) позволяет повысить эффективность использования суммарной пропускной способности оптического волокна (ОВ). ВОСП с DWDM характеризуются большим количеством каналов (разнос частот оптических трактов составляет 100 ГГц или 0,8 нм и менее), более высокими битовыми скоростями – 10 Гбит/с и выше и/или высокой передаваемой мощностью оптического излучения, вследствие чего в ОВ возникают нелинейные эффекты, влияющие на параметры передачи: фазовая самомодуляция (Self-Phase Modulation, SPM), фазовая кросс-модуляция (Cross-Phase Modulation, CPM) и четырехволновое смешивание (Four-Wave Mixing, FWM).

Нелинейная поляризация $P_{NL}(r,t)$ обуславливает зависимость показателя преломления от интенсивности, что является основной причиной рассматриваемых нелинейных эффектов, которая определяется следующим образом [1]:

$$P_{NL}(r,t) = \epsilon_0 \chi^{(3)} E^3(r,t), \tag{1}$$

где $\chi^{(3)}$ называется нелинейной чувствительностью третьего порядка и предполагается постоянной (независимой от t). Поэтому уравнение (1) позволяет анализировать все три типа нелинейных эффектов, оказывающих влияние на распространение сигналов в оптическом волокне.

Чтобы понять вышеописанные эффекты, рассмотрим систему DWDM с n каналами, для которой

$$E(r,t) = \sum_{i=1}^n E_i \cos(\omega_i t - \beta_i z). \tag{2}$$

$$\begin{aligned} P_{NL}(r,t) &= \epsilon_0 \chi^{(3)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n E_i \cos(\omega_i t - \beta_i z) E_j \cos(\omega_j t - \beta_j z) E_k \cos(\omega_k t - \beta_k z) = \\ &= \frac{3\epsilon_0 \chi^{(3)}}{4} \sum_{i=1}^n (E_i^2 + 2 \sum_{j \neq i} E_i E_j) E_i \cos(\omega_i t - \beta_i z) + \frac{\epsilon_0 \chi^{(3)}}{4} \sum_{i=1}^n E_i^3 \cos(3\omega_i t - 3\beta_i z) + \\ &+ \frac{3\epsilon_0 \chi^{(3)}}{4} \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i} E_i^2 E_j \cos[(2\omega_i - \omega_j)t - (2\beta_i - \beta_j)z] + \\ &+ \frac{3\epsilon_0 \chi^{(3)}}{4} \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i} E_i^2 E_j \cos[(2\omega_i + \omega_j)t - (2\beta_i + \beta_j)z] + \frac{6\epsilon_0 \chi^{(3)}}{4} \sum_{i=1}^n \sum_{j>i} \sum_{k>j} E_i E_j E_k \times \\ &\times \{ \cos[(\omega_i + \omega_j + \omega_k)t - (\beta_i + \beta_j + \beta_k)z] + \cos[(\omega_i + \omega_j - \omega_k)t - (\beta_i + \beta_j - \beta_k)z] + \\ &+ \cos[(\omega_i - \omega_j + \omega_k)t - (\beta_i - \beta_j + \beta_k)z] + \cos[(\omega_i - \omega_j - \omega_k)t - (\beta_i - \beta_j - \beta_k)z] \}. \end{aligned} \tag{3}$$

Нелинейная поляризация может быть представлена в виде

Первый член этого выражения отражает эффект SPM и CPM. Остальные члены $\omega_i + \omega_j - \omega_k$, $i, j \neq k$ (ω_i , ω_j необязательно совпадающие) отражают эффект FWM. Таким образом, нелинейность волокна генерирует новые поля (волны) на частоте $\omega_i \pm \omega_j \pm \omega_k$, т. е. при объединении трех волн с частотами ω_i , ω_j и ω_k создается четвертая волна (FWM).

Из всех нелинейных явлений четырехволновое смешивание имеет наибольшее значение для современных систем с DWDM, так как усиливается в волокне с малой дисперсией и при уменьшении интервалов между каналами, что приводит к значительному снижению допустимой передаваемой мощности в системе передачи.

Рассмотрим DWDM систему с N каналами. Для любых трех одновременно передаваемых оптических сигналов с частотами f_i , f_j и f_k новые частоты, возникающие вследствие FWM, представляются в виде:

$$f_{ijk} = f_i + f_j - f_k, \quad (4)$$

где $i, j, k \in [1, N]$ и $k \neq \{i, j\}$. Учитывая все варианты перестановок, N одновременно распространяющихся сигналов порождают $N^2(N-1)/2$ новых оптических сигналов [2]. Некоторые из этих сигналов попадают в соседние каналы, а некоторые – в другие области частот. Сигналы, которые попали в рабочие каналы, рассматриваются как перекрестные помехи по отношению к существующим сигналам, препятствующие нормальной работе DWDM системы.

Рассмотрим пример частотного распределения трех равномерно размещенных каналов с частотами f_1 , f_2 и f_3 до и после четырехволнового смешивания, рис. 1 а и б, где $\{f\}$ – частоты полезных сигналов, f_{ijk} (для $i, j, k \in [1, 3]$ и $k \neq \{i, j\}$) – частоты новых сигналов, возникших вследствие FWM.

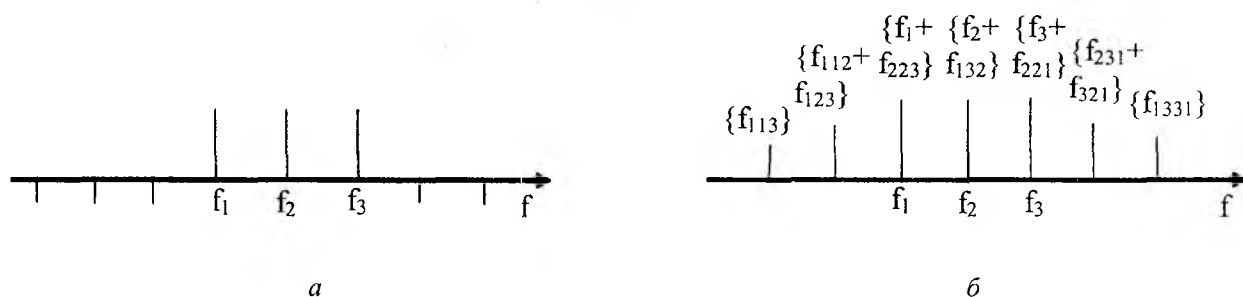


Рис. 1

Как показано на рис. 1 б, некоторые из новых сигналов расположились в других областях частот, а некоторые попали в область частот трех полезных сигналов, создавая вследствие четырех волнового смешивания перекрестные помехи, которых необходимо избегать.

Наиболее эффективное решение проблемы четырехволнового смешивания представляет собой неравномерное размещение каналов, при котором частоты каналов не совпадают или частично совпадают с частотами размещения комбинационных продуктов.

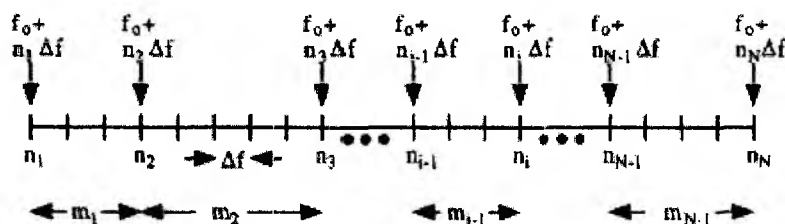


Рис. 2

При неравномерном размещении каналов оптический диапазон частот сначала разбивается на частотные слоты равной ширины Δf , как показано на рис. 2. Пусть f_0 – опорная частота. Тогда центральная частота i -го канала (слота) $f_i = f_0 + n_i \Delta f$, где n_i – номер слота i -го канала, $0 = n_1 < n_2 < \dots < n_i < \dots < n_N$ и N – общее количество каналов. Причем $m_i = n_{i+1} - n_i$ величина разнеса между i -м и $(i+1)$ -м каналами, $i = \{1, 2, 3, \dots, N-1\}$. Следовательно (3) можно выразить через количество слотов:

$$n_{ijk} = n_i + n_j - n_k, \tag{5}$$

где $i, j, k \in [1, N]$ и $k \neq \{i, j\}$.

Опираясь на вышесказанное, с целью предотвращения попадания сигналов FWM в заданные каналы, задачу оптимального размещения неравномерно размещенных каналов следует трактовать как определение множества слотов с различными номерами n_i : такими, чтобы порождаемые ими различные n_{ijk} -е не совпадали ни с одним из n_i -х при $i, j, k \in [1, N]$ и $k \neq \{i, j\}$ со следующими ограничениями [2].

Ограничение 1. Так как $m_i = n_{i+1} - n_i$ расстояние (разнос) между i -м и $(i+1)$ -м каналами, то неравенство

$$m_i \geq n \tag{6}$$

должно удовлетворять все $i = \{1, 2, 3, \dots, N-1\}$, где n минимальный разнос между каналами.

Кроме того, необходимо минимизировать весь оптический диапазон $B_{opt} = S \Delta f$, занимаемый N DWDM-каналами, ограничив общее количество слотов S .

Ограничение 2. Общее количество слотов

$$S = \sum_{i=1}^{N-1} m_i = n_N \tag{7}$$

должно быть минимальным.

Для определения числа комбинационных продуктов FWM при неравномерном размещении, попадающих во все каналы рабочей полосы системы с DWDM применен метод треугольника разности частот FDT (Frequency Difference Triangle). Метод позволяет определить общее количество продуктов четырехволнового смешивания, попадающих во все каналы рабочей полосы частот при том или ином неравномерном размещении.

Данные N каналов с номерами слотов $0 = n_1 < n_2 < \dots < n_i < \dots < n_N$ в соответствии с FDT записываются в виде матрицы

n_1	n_2	n_3	...	n_i	...	n_N	
	$n_2 - n_1$	$n_3 - n_1$...	$n_i - n_1$...	$n_N - n_1$	n_1
		$n_3 - n_2$		$n_i - n_2$		$n_3 - n_1$	n_2
			\vdots			\vdots	\vdots
						$n_N - n_{N-1}$	n_{N-1}
							n_N

Любые два элемента $n_i - n_j$ и $n_k - n_l$ в матрице являются соседними, если они тождественны (идентичны) при любом $i = l$ или $j = k$. Для наглядности все соседние элементы расположены по диагонали. Таким образом, первая диагональ представлена первым элементом каждой строки, вторая диагональ – вторым элементом каждой строки и так далее. Два

любых элемента являются соседними, если, во-первых, имеют одинаковое значение, а во-вторых, если элемент расположен в j -й строке и в α диагонали, то его соседний элемент должен располагаться в $(j-\alpha)$ -й или $(j+\alpha)$ -й строке. (Данное утверждение для $(j-\alpha)$ -й строки не выполняется при $j-\alpha \leq 0$. И, аналогично, если $j+\alpha \geq N$).

На основании этого метода составлен алгоритм расчета комбинационных продуктов FWM. Алгоритм приведен на рис. 3.

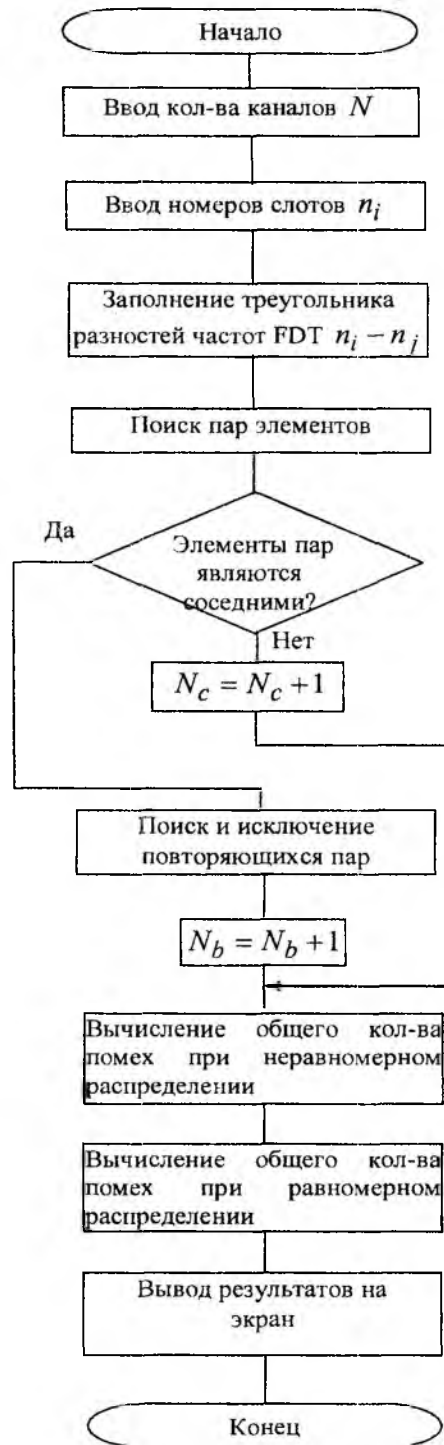


Рис. 3

В соответствии с разработанным алгоритмом проведен расчет количества комбинационных продуктов FWM для стандартной сетки частот с $\Delta F = 100$ ГГц. При равномерном распределении каналов общее количество комбинационных продуктов $N = 2370$ для количества спектральных каналов $N_k = 20$, при этом реальная полоса каждого канала составит 200 ГГц.

При неравномерном распределении каналов, частотный интервал между ними должен составлять не менее 100 ГГц. Число комбинационных продуктов в зависимости от размещения каналов варьируется в пределах от 1200 до 1350, т.е. их количество уменьшается примерно в два раза по сравнению с равномерным размещением. Следует заметить, что при неравномерном распределении каналов эффективное уменьшение числа помех достигается уменьшением числа спектральных каналов и увеличением частотного интервала между ними.

Список литературы: 1. *Иванов А.Б.* Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. М., 1999. 2. *Kwong W. C., Yang G.C.* An algebraic approach to the unecual-spaced channel-allocation problem in WDM lightwave systems, IEEE Trans. Commun, Vol. 45, Pp. 352 – 359, Mar. 1997. 3. *Forgieri F., Tkach R.W. Craplyvy A.R., Marcuse D.* Reduction of four-wave mixing crosstalk in WDM systems using unecually spaced channels, IEEE Photon. Technol. Lett. Vol. 6. Pp. 754 – 756, June 1994.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 12.05.2003