УДК 621.391

ОПТИМИЗАЦИЯ МОЩНОСТИ ЛИНЕЙНОГО СИГНАЛА СИСТЕМЫ DWDM

ПЕДЯШ В.В., РЕШЕТНИКОВА О.С.

Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова

POWER OPTIMIZATION OF LINEAR SIGNAL IN DWDM SYSTEM

PEDYASH V.V., RESHETNIKOVA O.S.

Odessa national academy of telecommunications named after A.S. Popov

Аннотация. *Рассматривается проблема оптимизации мощности линейного сигнала многоканальной системы со спектральным разделением оптических каналов с учетом нелинейных помех оптического волокна и шумов оптического усилителя, приведены формулы для расчета мощности канальных сигналов при разной величине межканального интервала.*

Summary. *The power optimization problem of a linear signal in multichannel system with spectral division of optical channels is considered taking into account nonlinear interference of an optical fibre and noise of the optical amplifier, formulas for power calculation of channel signals are deduced at different channel offsets.*

Построение сетей следующего поколения осуществляется путем уплотнения существующих и строительством новых волоконно-оптических линий связи при помощи технологии DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing). Основной проблемой, с которой сталкиваются при проектировании магистралей на базе данной технологии, является нелинейная помеха четырехволнового смешения (ЧВС) [1], которая приводит к межканальной интерференции и ухудшает качество организуемых оптических каналов. В расчетах также необходимо учитывать ряд других помех, таких как собственные шумы оптического усилителя (усиленное спонтанное излучение ASE). Известно, что мощность группового сигнала DWDM оказывает непосредственное влияние на значение мощности помехи ЧВС и не влияет на мощность шумов ASE. Поэтому при проектировании магистрали с DWDM необходимо выполнять оптимизацию мощности сигнала передатчика для минимизации вероятности ошибки в оптическом канале. В работах [2-3] приводятся выражения для расчета мощности помех ЧВС, однако основное внимание в них уделено сопоставлению теоретических результатов расчета и экспериментальным измерениям мощности помех ЧВС. Выбор оптимального значения мощности канальных сигналов в передатчике в этих работах не проводился. Поскольку системы WDM, как правило, работают по стандартному оптическому волокну (рекомендация ITU G.652), то ему и следует уделить основное внимание.

Поэтому целью данной статьи является оптимизация мощности сигнала передатчика системы DWDM с учетом эффекта четырехволнового смешения в стандартном оптическом волокне.

В зарубежной литературе [2-3] приводится следующая формула для расчета мощности помехи ЧВС

$$P_{ijk}(f_i, f_j, f_k) = \frac{\eta}{9} D^2 \gamma^2 P_i P_j P_k e^{-\alpha L} \left\{ \frac{(1-e^{-\alpha L})^2}{\alpha^2} \right\}, \qquad (1)$$

где P_i, P_j и P_k - мощности входных канальных сигналов на частотах f_i, f_j и f_k соответственно;

D – коэффициент вырожденности (D=3 при i=j и D=6 при $i \neq j$);

α - коэффициент затухания оптического волокна (ОВ);

L – длина отрезка ОВ.

В данной формуле и последующем тексте статьи рассматривается пиковая мощность сигнала. Для кода NRZ, применяемого в системах DWDM, средняя мощность сигнала на 3 дБ ниже пиковой.

Коэффициент нелинейности γ на длине волны λ рассчитывается по формуле

$$\gamma = \frac{2\pi n_2}{\lambda A_{\text{эфф}}}, \tag{2}$$

где n_2 - коэффициент нелинейности показателя преломления ($n_2 = 2,68 \cdot 10^{-20}$ м^2/Вт);

$A_{\text{эфф}}$ - эффективная площадь оптического волокна ($A_{\text{эфф}}$ =50 мкм^2).

В свою очередь, эффективность η ЧВС описывается формулой

$$\eta = \frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \Delta\beta^2}\left[1 + \frac{4e^{-\alpha L}\sin^2\left(\frac{\Delta\beta L}{2}\right)}{\left(1 - e^{-\alpha L}\right)^2}\right]. \tag{3}$$

Коэффициент фазового согласования $\Delta\beta$ зависит от межканального интервала, хроматической дисперсии $D_c(\lambda)$ и ее производной $dD_c(\lambda)/d\lambda$ на длине волны λ_k

$$\Delta\beta = \frac{2\pi\lambda_k^2}{c}\Delta f_{ik}\Delta f_{jk}\left[D_c(\lambda) + \frac{\lambda_k^2}{2c}\left(\Delta f_{ik} + \Delta f_{jk}\right)\frac{dD_c(\lambda)}{d\lambda}\right], \tag{4}$$

где интервал между каналами $\Delta f_{ik} = \left| f_i - f_k \right|$ и $\Delta f_{jk} = \left| f_j - f_k \right|$;

c – скорость света (с≈3·10^8 м/с).

Мощность помехи ЧВС на частоте f_m равна сумме мощностей всех комбинационных продуктов [4]:

$$P_{\text{чвс1}}(f_m) = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=i}^{N} P_{ijk}(f_i, f_j, f_k), \tag{5}$$

где N - количество каналов.

При проведении вычислений по данной формуле для каждой комбинации f_i и f_j необходимо рассчитать $f_k = f_i + f_j - f_m$. При выполнении условия $f_1 \le f_k \le f_N$ мощность помехи ЧВС на частоте f_m рассчитывается по формуле (1), в противном случае мощность помехи принимается равной нулю.

Дальнейшие вычисления проведем для WDM системы, состоящей из $N_{\text{ус}}$ оптических усилителей и секций одинаковой длины L (рис. 1). С целью увеличения уровня сигнала на входе приемного оптического модуля (ПРОМ) также установлен оптический усилитель с номером ($N_{ус}$ +1).

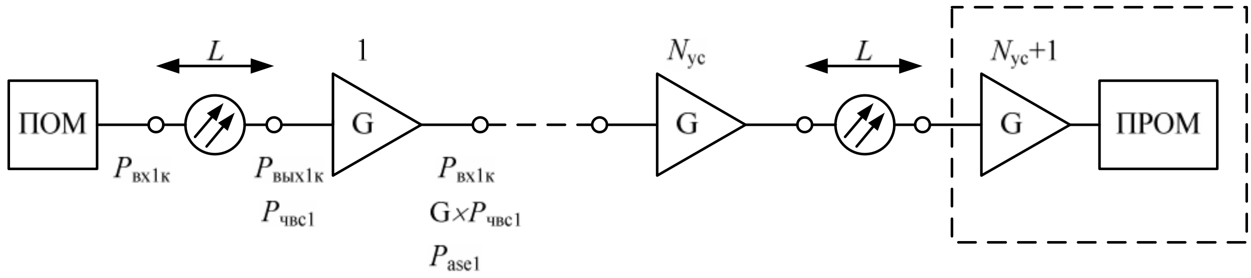


Рисунок 1 – Структурная схема системы WDM

Примем мощность сигнала одного оптического канала на выходе усилителя равной мощности передающего оптического модуля (ПОМ) $P_{вх1к}$. В этом случае сигнал с мощностью $P_{вых1к}$ на выходе секции ОВ необходимо усилить в $G = P_{вх1к} / P_{вых1к} = 1/e^{-\alpha L}$ раз.

Известно [5], что мощность усиленного спонтанного излучения (ASE) вычисляется по формуле

$$P_{ase1} = 2n_{sp}(G-1)hf_m\Delta f_o\,, \quad (6)$$

где n_{sp} - коэффициент спонтанной эмиссии усилителя ($n_{sp} \approx 1{,}4$);

h – постоянная Планка (h=6,626·10^{-34} Дж·с);

Δf_o- ширина полосы пропускания оптического фильтра демультиплексора WDM ($\Delta f_o \cong 1{,}25B$);

B – скорость передачи цифрового сигнала по оптическому каналу.

Поскольку в рассматриваемом примере все участки одинаковой длины, мощность усиленного спонтанного излучения на входе приемного оптического модуля (ПРОМ) равна сумме соответствующих мощностей на выходе всех усилителей:

$$P_{ase\Sigma} = P_{ase1}(N \; +1)\,. \quad (7)$$

Мощность ЧВС на входе ПРОМ рассчитывается аналогично

$$P_{чвс\Sigma} = P_{чвс1}G(N_{ус}+1)\,. \quad (8)$$

На выходе фотоприемника оптический шум ЧВС и ASE соответственно формируют электрический сигнал с мощностями [6]

$$P_{eчвс\Sigma} = 2b^2 P_{вх1к}\,\frac{P_{чвс\Sigma}}{8} \quad (9)$$

и

$$P_{ease\Sigma} = 4b^2 P_{\text{вх1к}} P_{ase\Sigma} \frac{\Delta f_e}{\Delta f_o}, \qquad (10)$$

где Δf_e - полоса пропускания электрического усилителя ПРОМ ($\Delta f_e \cong 0,7B$).

Чувствительность фотоприемника b равна [6]

$$b = \frac{\eta e}{h f_m}, \qquad (11)$$

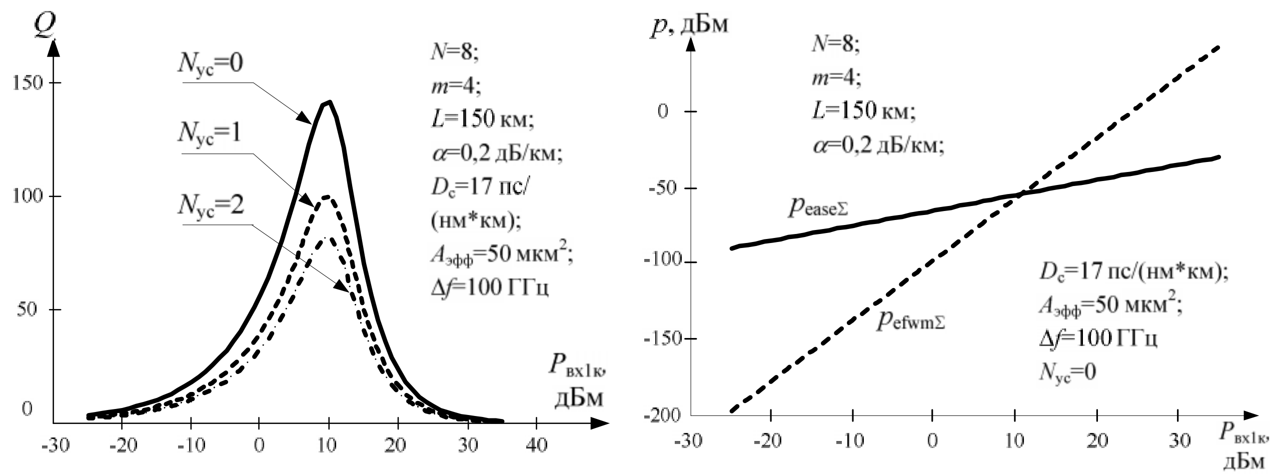
где η - квантовая эффективность фотодетектора (η=0,8 для pin фотодиода);
e – заряд электрона (e=1,6·10^{-19} Кл).
Q-фактор и связанная с ним вероятность ошибки рассчитываются по формулам [6]:

$$Q \approx \frac{bP_{\text{вх1к}}}{\sqrt{P_{ease\Sigma} + P_{e\text{чвс}\Sigma}}} \qquad (12)$$

и

$$P_{\text{ош}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_Q^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx . \qquad (13)$$

Из вышеприведенных формул (1) - (11) видно, что Q и $P_{\text{ош}}$ зависят от мощности сигнала передатчика $P_{\text{вх1к}}$ (рис. 2).



а) б)

Рисунок 2 – Влияние уровня передачи на:

а) Q-фактор;

б) уровень помех ЧВС и усиленного спонтанного излучения.

Для упрощения последующих вычислений подставим формулу (4) в (3), а затем полученное выражение - в формулу (1). После этого выполним следующие приближения:

1) в знаменателе формулы (3) $\alpha^2 << \Delta\beta^2$, следовательно $(\alpha^2 + \Delta\beta^2) \approx \Delta\beta^2$;

2) для стандартного оптического волокна в формуле (4) значение первого слагаемого $D_c(\lambda)$ намного больше второго слагаемого, поэтому последним можно пренебречь;

3) поскольку в формуле (3) синус является периодической функцией, то при достаточно большом количестве каналов N его аргумент будет носить равномерный закон распределения в диапазоне [0;2π], поэтому функцию можно заменить ее среднеквадратическим значением $\sin^2(\Delta\beta L/2) \approx 0,7^2 \approx 0,5$;

4) в формуле (4) примем $\lambda_k \approx 1550$ нм для всех каналов ($1 \le k \le N$), поскольку интервал между каналами намного меньше длины волны первого канала.

С учетом вышесказанного, при одинаковой мощности $P_{\text{вх1к}}$ во всех каналах и одинаковом межканальном интервале Δf, формула (5) примет следующий вид

$$P_{\text{чвс1}}(f_m) \approx const \cdot sum_{ij}, \tag{14}$$

где

$$const = \frac{1}{36} \frac{e^{-\alpha L}\left(1 + e^{-2\alpha L}\right) c^2 \gamma^2 P^3_{\text{вх1к}}}{\left[\pi \lambda_k^2 D_c(\lambda_k)\right]^2 \Delta f^4} \tag{15}$$

и

$$sum_{ij} = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=i}^{N} \frac{D^2}{|i-k|^2 \, |j-k|^2}. \tag{16}$$

В формуле (16) значение $k = i + j - m$ должно удовлетворять условию $1 \le k \le N$.

Расчеты показали, что наибольшая мощность помехи ЧВС возникает в центральных каналах ($m = N/2$), поэтому дальнейшие вычисления проведены именно для этих каналов. При приблизительных расчетах формулу (16) можно аппроксимировать следующим выражением

$$sum_{ijk} \approx 212,8 \frac{\lg(N)}{N^{0,2}}. \tag{17}$$

Из рис. 2 можно сделать вывод о том, что в точке экстремума функции $Q(P_{\text{вх1к}})$ выполняется равенство $P_{ease\Sigma} \approx P_{e\text{чвс}\Sigma}$. Приравняв выражения (9), (10) и проведя необходимые преобразования, получаем условие экстремума $Q(P_{\text{вх1к}})$:

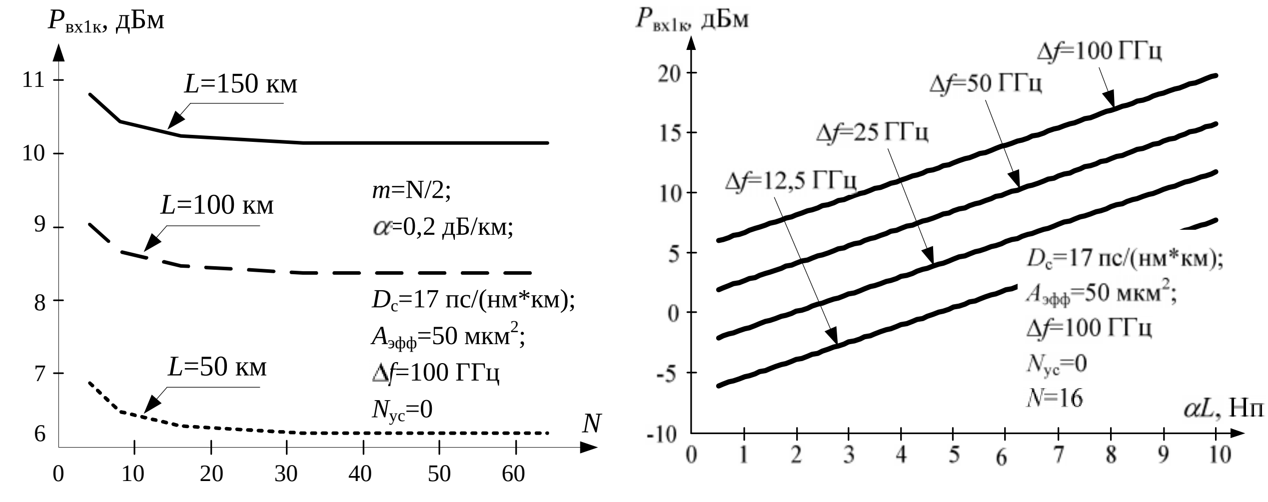
$$P_{\text{чвс}\Sigma} \approx 9 P_{\text{ase}\Sigma}. \tag{18}$$

Получение максимального значения Q-фактора на входе фотоприемника возможно в случае выполнения условия (18) на каждой секции линии. В рассматриваемой схеме (рис. 1) все секции одинаковой длины, поэтому достаточно выполнение условия $G \times P_{\text{чвс}1} = 9P_{ase1}$. В этом случае из выражений (14) и (15) определим оптимальное значение $P_{\text{вх}1\text{к}}$:

$$P_{\text{вх}1\text{к}} = \sqrt[3]{\frac{9P_{ase1}}{\frac{1}{36}\frac{e^{-\alpha L}\left(1+e^{-2\alpha L}\right)c^2\gamma^2 G}{\left[\pi\lambda_k^2 D_c(\lambda_k)\right]^2 \Delta f^4} sum_{ijk}}}. \qquad (19)$$

Данная формула позволяет найти оптимальное значение мощности сигнала для секций с известными параметрами передатчика, приемника и среды передачи. График зависимости оптимального уровня передачи от количества каналов системы WDM показан на рис. 3, а. Данный график показывает, что оптимальная мощность оптического сигнала на входе оптического волокна должна незначительно возрастать при увеличении его длины. Это объясняется тем, что с увеличением длины оптического волокна возрастает вносимое им затухание и мощность помех ЧВС уменьшается. Поэтому для выполнения условия максимизации Q-фактора (18) необходимо повышать мощность входного сигнала. Также график показывает, что вводимая мощность $P_{\text{вх}1\text{к}}$ должна уменьшаться с ростом числа каналов N. Это объясняется тем, что увеличение числа каналов приводит к росту числа слагаемых в формуле (16) и росту мощности помехи ЧВС. Следовательно, для выполнения условия (18), при постоянной величине $P_{ase\Sigma}$, вводимая мощность $P_{\text{вх}1\text{к}}$ должна уменьшаться.

Значение выражения (19) зависит от следующих параметров среды передачи: дисперсии D_c, коэффициента затухания α и длины волокна L. Системы DWDM, в основном, работают по стандартному оптическому волокну с дисперсией D_c =17 пс/(нм·км), поэтому $P_{\text{вх}1\text{к}}$ зависит только от затухания волокна αL. Численные расчеты показывают, что зависимость $P_{\text{вх}1\text{к}}(\alpha L)$ имеет линейный характер (рис. 3,б). Аппроксимационные формулы вычисления данной зависимости для различных межканальных интервалов Δf приведены в табл. 1. Следует отметить, что коэффициент затухания необходимо подставлять в неперах.



а) б)

Рисунок 3 – Зависимость оптимального уровня передачи сигнала от:
а) количества каналов системы WDM;

б) затухания оптического волокна

Таблица 1 – Вычисление мощности индивидуальных канальных сигналов на входе ОВ

Δf , ГГц	$P_{\text{вх1к}}$, дБм
100	$1,45\alpha L+5,22$
50	$1,45\alpha L+1,2$
25	$1,45\alpha L-2,82$
12,5	$1,45\alpha L-6,83$

Подводя итоги можно сделать вывод о том, что для максимизации Q-фактора необходимо проводить оптимизацию мощности сигнала передатчика согласно выражению (19). С увеличением количества каналов N оптимальное значение мощности сигнала одного канала передатчика уменьшается, поскольку увеличивается количество слагаемых межканальной интерференции в выражении (14). Наибольшее количество этих слагаемых соответствует средним каналам, наименьшее – крайним. Также получены аппроксимационные выражения для вычисления оптимального значения мощности сигнала передатчика в зависимости от затухания оптического волокна.

В дальнейших исследованиях в данном направлении необходимо исследовать поведение мощности помехи ЧВС при неравномерном частотном интервале между каналами.

Литература

1. Hill K. O., Johnson D. C., Kawasaki B. S., MacDonald R. I. CW three-wave mixing in single-mode optical fibers // Journal of Applied Physics. -1978. –Vol. 49, № 10. –P. 5098-5106.
2. Tkach R.W., Chraplyvy A.R.; Forghieri F., Gnauck A.H., Derosier, R.M. Four-photon mixing and high-speed WDM systems //. – 1995. –Vol. 13, № 5. –P. 841 - 849.
3. Song, S., Allen C.T., Demarest K.R., Hui R. Intensity-dependent phase-matching effects on four-wave mixing inoptical fibers // Journal of Lightwave Technology. -1999. – Vol. 17, № 11. –P. 2285 – 2290.
4. Maeda M.W., Sessa W.B., Way W.I., Yi-Yan A., Curtis L., Spicer R., Laming, R.I. The effect of four-wave mixing in fibers on optical frequency-division multiplexed systems // Journal of Lightwave Technology. – 1990. –Vol. 8, № 9. –P. 1402 – 1408.
5. Убайдуллаев Р.Р. Протяженные ВОЛС на основе EDFA // Lightwave russian edition. -2003. -№ 1. -С. 22-29.
6. Inoue K. A simple expression for optical FDM network scale considering fiberfour-wave mixing and optical amplifier noise // Journal of Lightwave Technology. – 1995. –Vol. 2, № 5. –P. 856-861.