

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН НА ОТНОШЕНИЕ  
ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛ/ШУМ В ВОСП СРК****ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ОПТИЧНИХ ВОЛОКОН НА ВІДНОШЕННЯ  
ОПТИЧНИХ СИГНАЛ/ШУМ У ВОСП СРК****INFLUENCE OF OPTICAL FIBERS PARAMETERS ON A OPTICAL SIGNAL-TO-  
NOISE RATIO IN DWDM SYSTEMS**

**Аннотация.** В статье проведено сопоставление оптических волокон известных производителей по критерию качества оптических каналов ВОСП со спектральным разделением каналов. В расчетах учтено совместное действие шумов четырехволнового смешения и усиленного спонтанного излучения.

**Анотація.** У статті проведено зіставлення оптичних волокон відомих виробників за критерієм якості оптичних каналів ВОСП зі спектральним розподілом каналів. У розрахунках врахована одночасна дія шумів чотирихвильового змішування та підсиленого спонтанного випромінювання.

**Summary.** Comparison of optical fibers of known manufacturers by criterion of quality of WDM optical channels is considered in the article. The action of noises of four-wave mixing and the amplified spontaneous emission is considered in calculations.

Использование систем спектрального разделения каналов (СРК) для уплотнения оптических волокон является одной из проблем развития сетей следующего поколения NGN. Известно, что параметры качества оптических каналов ВОСП СРК, в основном, зависят от мощности шума усиленного спонтанного излучения оптического (УСИ) и межканальных помех четырехволнового смешения (ЧВС). Проектирование магистралей на основе данной технологии СРК подразумевает подбор кабеля (оптических волокон) с максимальной технико-экономической эффективностью, подразумевающей обеспечение допустимой вероятности ошибки при минимальной стоимости среды распространения. В литературе [1] проводится сравнение распространенных типов оптических волокон по качественным параметрам (коэффициенту затухания, дисперсии и т.п.), однако детального их сравнения по достижимому отношению сигнал/шум в оптических каналах ВОСП СРК не проводилось.

Поэтому целью данной статьи является сравнение распространенных типов оптических волокон по отношению сигнал/шум оптического сигнала на выходе оптического канала ВОСП СРК при учете шумов усиленного спонтанного излучения и межканальных помех четырехволнового смешения.

В современных системах DWDM используются оптические волокна с ненулевой смещенной дисперсией (NZ-DSF), удовлетворяющие рекомендации ITU G.655 [2]. Каждый подтип данных волокон изначально разрабатывается для использования в наземных или подводных линиях передачи. Технические показатели последнего типа волокон несколько выше, поскольку подводные линии передачи, по сравнению с наземными, содержат большее количество усилительных секций. В качестве примера, в табл. 1 приведены следующие параметры распространенных волокон фирм Furukawa Electric [3] и Corning Incorporated [4]:

- коэффициент затухания  $\alpha$ ;
- эффективная площадь волокна  $A_{\text{эфф}}$ ;
- коэффициент дисперсии  $D$ ;

– производная дисперсии  $dD/d\lambda$ .

В данной статье сравнение проводилось путем сопоставления отношения оптических мощностей сигнал/шум ( $OSNR$ ) на выходе одной усилительной секции (рис. 1).

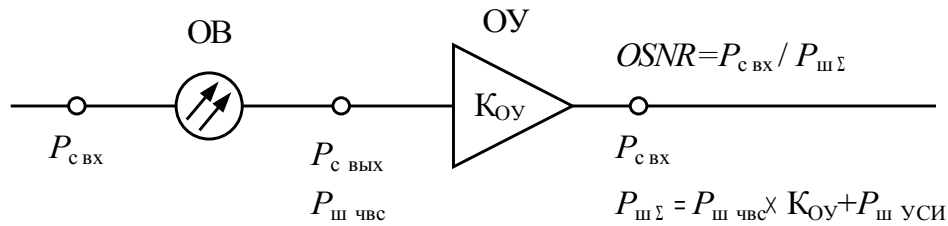


Рисунок 1 – Функциональная схема оптической секции

Секция состоит из отрезка оптического волокна (ОВ) и оптического усилителя (ОУ) со значением коэффициента усиления  $K_{ou}$ . В виду технической возможности компенсации дисперсионных искажений, последние в расчетах не учитывались. Также предполагалась полная компенсация затухания ОВ, для чего коэффициент усиления усилителя выбирался равным

$$K_{ou} = \frac{P_{c \text{ вх}}}{P_{c \text{ вых}}} = \frac{1}{e^{-\alpha L}},$$

где  $P_{c \text{ вх}}$  и  $P_{c \text{ вых}}$  – мощность сигнала на входе и выходе ОВ;

$\alpha$  – коэффициент затухания ОВ;

$L$  – длина ОВ.

Таблица 1 – Параметры волокон SMF и NZ-DSF

№ п/п	Тип волокна	Параметры			
		Затухание $\alpha$ , дБ/км	$A_{эфф}$ , мкм <sup>2</sup>	Дисперсия $D$ , с/(нм·км)	Производная дисперсии $dD/d\lambda$ , пс/(нм <sup>2</sup> ·км)
<b>Фирма Furukawa Electric Co, Ltd.</b>					
1.	TrueWave RS LWP Fiber	0,20	52	+4,28	0,05
2.	TrueWave® REACH Fiber	0,20	55	+7,43	0,045
3.	TrueWave® SRS Fiber	0,20	50	-2,8	0,045
4.	TrueWave® XL Fiber	0,20	72	-3,0	0,115
5.	AllWave® ZWP Ocean Fiber	0,188	83	+16,6	0,060
6.	AllWave® FLEX ZWP Ocean Fiber	0,189	76	+16,9	0,060
<b>Фирма Corning</b>					
7.	Corning® SMF-28e+ Fiber	0,20	83	18,0	+0,092
8.	Corning® LEAF® optical fiber	0,20	72	+4,28	+0,05
9.	Vascade® L1000 Fiber	0,187	100	+18,5	+0,06
10.	Vascade® LS+ Fiber	0,201	48	-3,0	+0,05
11.	Vascade® LEAF EP Fiber	0,200	65	-4,0	+0,12
12.	Vascade® EX1000 Fiber	0,174	76	+18,5	+0,06
13.	Vascade® EX2000 Fiber	0,162	112	+20,4	+0,06

В данной статье шум на выходе оптической секции состоит из суммы шума УСИ и помехи ЧВС:

$$P_{ш\Sigma} = P_{шУСИ} + P_{шЧВС} \times K_{ОУ},$$

где  $P_{шЧВС}$  – мощность шума помехи ЧВС на выходе ОВ;

$P_{шУСИ}$  – мощность шума усиленного спонтанного излучения на выходе усилителя.

Последний параметр рассчитывался по известной формуле [5]:

$$P_{шУСИ} = 2n_{СП}(K_{ОУ} - 1)h f_m \Delta f_o,$$

где  $n_{СП}$  – коэффициент спонтанной эмиссии усилителя ( $n_{sp} \approx 2$  для стандартного значения шум-фактора в 6 дБ);

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

$f_m$  – центральная частота оптического канала с номером  $m$ ;

$\Delta f_o$  – ширина полосы пропускания оптического фильтра демультиплексора DWDM (выбиралась равной половине межканального интервала  $\Delta f$ ).

Мощность шума ЧВС каждого нелинейного компонента рассчитывалась по стандартной формуле [6, 7]

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

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  $i \neq j$ ).

Особенности использования данного выражения для расчета суммарной мощности помехи ЧВС детально описаны в работе [8] и в данной статье не приводятся. Перед проведением сравнения ОВ необходимо выбрать номер канала, для которого будет рассчитываться  $OSNR$ , а также оптимальную мощность сигнала на входе ОВ. Для решения первой задачи на рис. 2 приведена зависимость мощности помехи ЧВС от номера канала для 16 используемых длин волн.

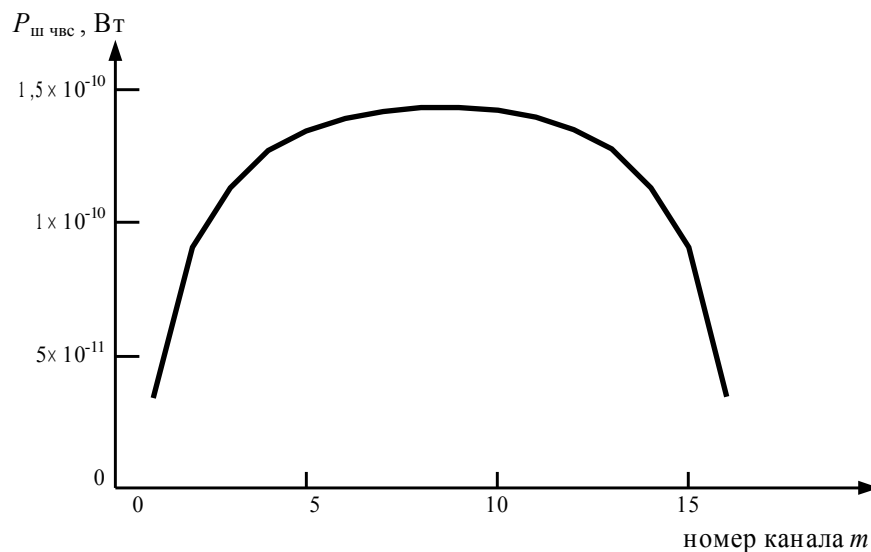


Рисунок 2 – Зависимость мощности четырехволнового смешения от номера канала ВОСП СРК

Также расчеты показали, что характер графика практически не зависит от количества каналов. Характер графика позволяет сделать вывод о том, что наибольшая мощность помех ЧВС генерируется на частотах центральных каналов, поскольку на них приходится

наибольшее количество нелинейных комбинационных продуктов помехи ЧВС, поэтому дальнейшие вычисления проводились для восьмого канала ( $m = 8$ ). На рис. 3 показано влияние мощности входного сигнала на  $OSNR$ . Данный график имеет экстремум в виде максимума, поскольку при малых мощностях входного сигнала доминируют шумы УСИ, а при больших – помехи ЧВС, которые также уменьшают отношение сигнал/шум на выходе канала. Поэтому в дальнейших вычислениях проводилась оптимизация мощности передаваемого сигнала с целью определения максимального значения  $OSNR$ .

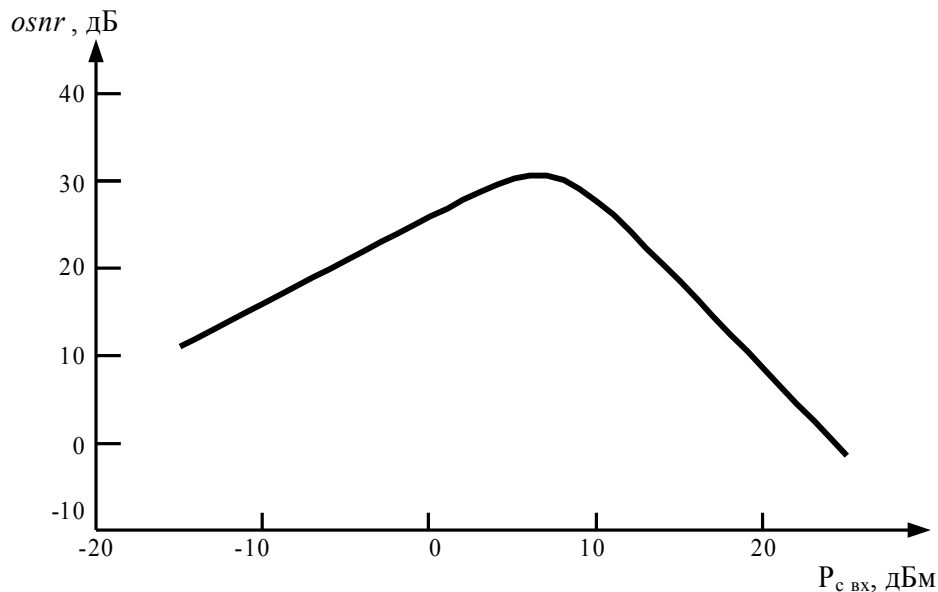


Рисунок 3 – Зависимость параметров каналов ВОСП СРК от мощности сигнала передатчика

Построенная с учетом вышеуказанных соображений столбчатая диаграмма  $OSNR$  (рис. 4) показывает, что наибольшее отношение сигнал/шум можно обеспечить в случае использования оптических волокон типа AllWave® ZWP Ocean Fiber, AllWave® FLEX ZWP Fiber, Vascade® L1000 Fiber, Vascade® EX1000 Fiber и Vascade® EX2000 Fiber, предназначенных для подводных линий передачи. Данные волокна имеют увеличенную эффективную площадь сечения для уменьшения мощности помехи ЧВС, что и подтверждается расчетами. Анализ результатов расчета, показывает, что независимо от длины секции, наилучшим среди рассмотренных волокон для подводных линий ВОЛС является Vascade® EX2000 Fiber, а наихудшим – AllWave® FLEX ZWP Fiber. Последнее волокно является технически более эффективным, поскольку обладает наименьшим коэффициентом затухания и наибольшей эффективной площадью  $A_{эфф}$ . Разница в  $OSNR$  для одной оптической секции с использованием двух указанных волокон составляет от 2,5 дБ до 4,4 дБ в зависимости от длины волокна и межканального интервала системы DWDM.

Остальные оптические волокна предназначены для использования в наземных ВОЛС, поэтому имеют несколько худшие параметры (и  $OSNR$  в результате). Независимо от длины секции, наилучшие параметры качества оптических каналов обеспечиваются путем применения волокна типа Corning® SMF-28e+. Это поясняется тем, что данное волокно имеет наибольшую дисперсию и эффективную площадь сечения, что и приводит к минимизации продуктов ЧВС. Несколько худшими параметрами обладает волокно типа TrueWave® REACH. Для длин секций до 100 км включительно, наихудшее качество каналов обеспечивается путем использования волокна TrueWave® SRS, а для больших длин секций – Vascade® LS+.

□ L=50 км  
 ■ L=100 км  
 ■ L=150 км

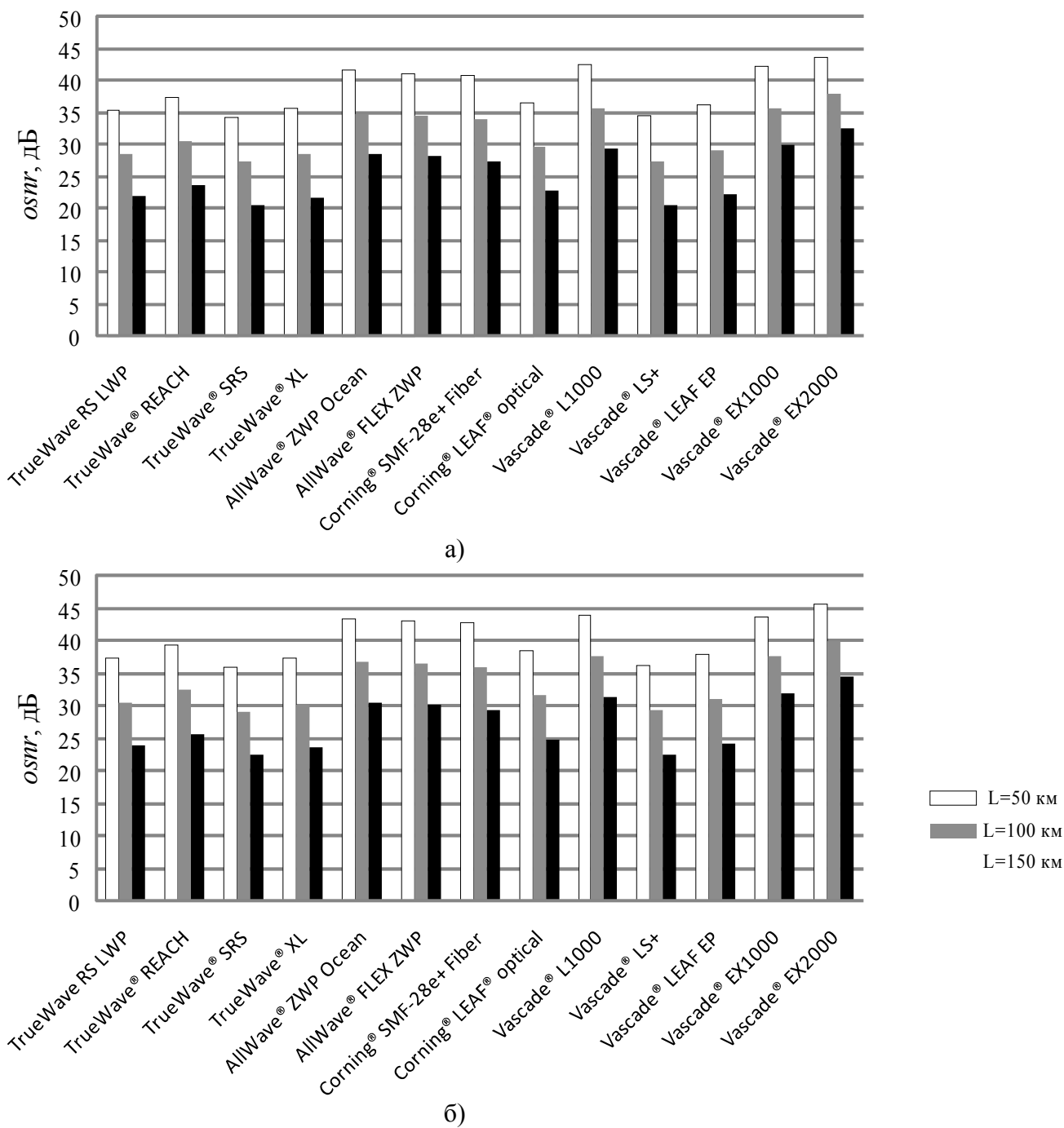


Рисунок 4 – Параметры каналов ВОСП СРК: а) межканальный интервал  $\Delta f = 50$  ГГц; б) межканальный интервал  $\Delta f = 100$  ГГц

В заключение следует отметить, что поставленная в статье задача сравнения распространенных типов оптических волокон по отношению сигнал/шум оптического сигнала на выходе оптического канала ВОСП СРК при учете шумов усиленного спонтанного излучения и межканальных помех четырехволнового смешения выполнена. Предложена математическая модель для расчета параметров качества оптической секции ВОСП.

Установлено, что получение максимального отношения сигнал/шум возможно путем выполнения оптимизации мощности канального сигнала. Показано, что оптические волокна для подводных линий связи при большой протяженности оптических секций имеют существенное преимущество перед волокнами, предназначенными для построения наземных систем связи.

#### Литература

1. [Сравнительный анализ характеристик ОВ](http://lib.qserty.ru/static/tutorials/40_fiber03.pdf) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [lib.qserty.ru/static/tutorials/40\\_fiber03.pdf](http://lib.qserty.ru/static/tutorials/40_fiber03.pdf). Заголовок з екрана.
2. G.655: Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://202.114.9.3/xueke/wldz/bz/g/6.pdf>. Заголовок з екрана.
3. OFS Optical Fiber [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ofsoptics.com/fiber/>. Заголовок з екрана.
4. Optical Fiber [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.corning.com/opticalfiber/>. Заголовок з екрана.
5. *Убайдуллаев Р.Р.* Протяженные ВОЛС на основе EDFA / Р.Р. Убайдуллаев // *Lightwave russian edition*. – 2003. – № 1. – С. 22-29.
6. *Tkach R.W., Chraplyvy A.R.; Forghieri F., Gnauck A.H., Derosier R.M.* Four-photon mixing and high-speed WDM systems / R.W. Tkach, A.R. Chraplyvy, F. Forghieri и др. / *Journal of Lightwave Technology*. – 1995. – Vol. 13, № 5. – P. 841 – 849.
7. *Song S., Allen C.T., Demarest K.R., Hui R.* Intensity-dependent phase-matching effects on four-wave mixing in optical fibers / S. Song, C.T. Allen, K.R. Demarest, R. Hui // *Journal of Lightwave Technology*. – 1999. – Vol. 17, № 11. – P. 2285 – 2290.
8. *Педяш В.В.* Влияние фазовой самомодуляции оптического сигнала на качество каналов ВОСП СРК / В.В. Педяш, О.С. Решетникова // *Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова*. – 2010. – № 1. – С. 109-114.