

# Дисперсия и широкополосность ВОЛС

*Семенов Б.В.*

# **Дисперсия оптических сигналов в ОВ**

- 1. Виды дисперсий**
- 2. Расчет дисперсий**
- 3. Расчет полной дисперсии оптической линии**
- 4. Расчет широкополосности оптической линии**
- 5. Методы компенсации дисперсии**

# Дисперсия оптических сигналов в ОВ

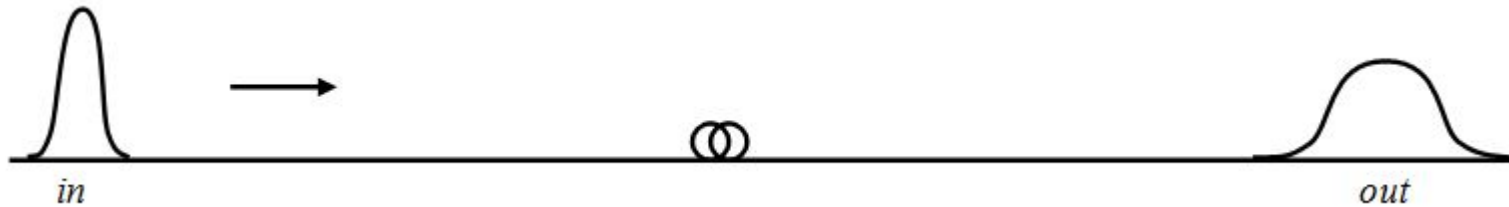


Рис. 1 – Изменение формы оптического импульса при распространении в ОВ

Дисперсия  $\tau$  – уширение импульсов (пс): 
$$\tau = \sqrt{\tau_{out}^2 - \tau_{in}^2}$$

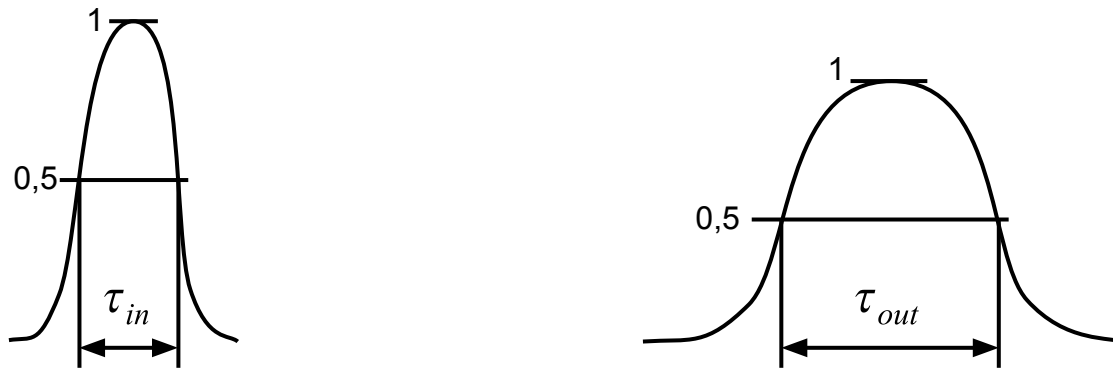


Рис. 2 – К определению дисперсии

# Дисперсия оптических сигналов в ОВ

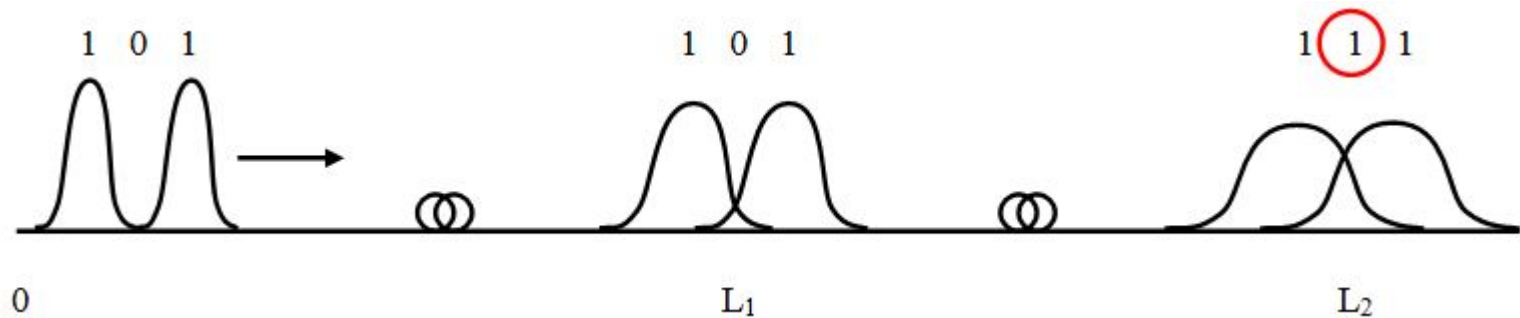


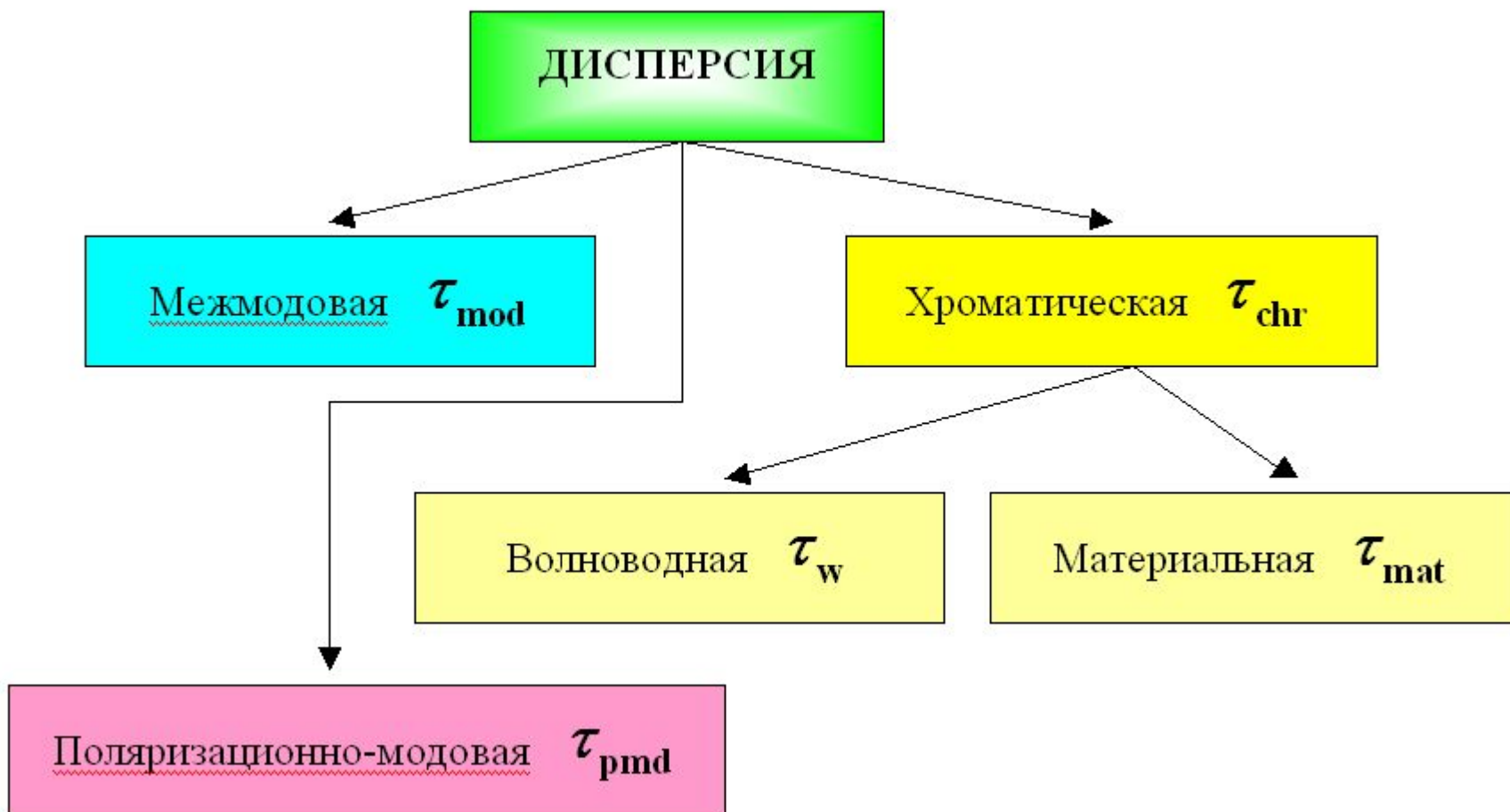
Рис. 3 – Возникновение битовых ошибок

## Постулат 1.

Дисперсия ограничивает предельную длину линии передачи при заданной скорости передачи данных.

## Постулат 2.

Дисперсия ограничивает предельную скорость передачи данных при заданной длине линии передачи (в нашем примере для корректной передачи данных на расстояние  $L_2 > L_1$  необходимо понизить скорость передачи данных).



Дисперсия (dispersion)

## Межмодовая дисперсия

Возникает из-за разной скорости распространения мод и имеет место только в многомодовых волокнах (MMF).

$$\tau_{\text{mod}} = \tau_{\text{mod} \text{ y} \delta} L, \text{ нс}$$

где

$\tau_{\text{mod} \text{ y} \delta}$  – удельная межмодовая дисперсия волокна (пс/км);  
 $L$  – длина линии (км).

Тип волокна	$\lambda$ , нм	<u>Межмодовая дисперсия</u> $\tau_{\text{mod}}$ , <u>пс/км</u>
<u>MMF 50/125</u>	850	414
	1310	414
	1550	414
MMF 62,5/125	850	973
	1310	973
	1550	973

## Хроматическая дисперсия

Состоит из двух дисперсий – *материальной* и *волноводной*:

$$\tau_{chr} = \tau_{mat} + \tau_w$$

*Материальная хроматическая дисперсия* обусловлена зависимостью коэффициента преломления стекла от длины волны  $n = n(\lambda)$  и возникает вследствие некогерентности спектра излучения излучателей:

$$\tau_{mat} = \Delta\lambda \cdot M(\lambda) \cdot L, \text{ пс}$$

где  $\Delta\lambda$  – ширина спектра излучения излучателя (нм);

$M(\lambda)$  – удельная материальная дисперсия  $\left( \frac{\text{пс}}{\text{нм} \cdot \text{км}} \right)$ ;

$L$  – длина линии (км).

## Хроматическая дисперсия

Состоит из двух дисперсий – *материальной* и *волноводной*:

$$\tau_{chr} = \tau_{mat} + \tau_w$$

**Волноводная хроматическая дисперсия** обусловлена зависимостью скорости распространения оптического сигнала в волокне (двухслойном диэлектрическом волноводе) от длины волны  $\nu = \nu(\lambda)$  и возникает вследствие некогерентности спектра излучения излучателей:

$$\tau_w = \Delta\lambda \cdot N(\lambda) \cdot L, \text{ пс}$$

где  $\Delta\lambda$  – ширина спектра излучения излучателя (нм);

$N(\lambda)$  – коэффициент удельной волноводной дисперсии  $\left( \frac{\text{пс}}{\text{нм} \cdot \text{км}} \right)$ ;

$L$  – длина линии (км).



## Хроматическая дисперсия

Состоит из двух дисперсий – *материальной* и *волноводной*:

$$\tau_{chr} = \tau_{mat} + \tau_w$$

Хроматическая дисперсия:

$$\tau_{chr} = \tau_{mat} + \tau_w = \Delta\lambda \cdot M(\lambda) \cdot L + \Delta\lambda \cdot N(\lambda) \cdot L = \Delta\lambda \cdot D(\lambda) \cdot L$$

$$\tau_{chr} = \Delta\lambda \cdot D(\lambda) \cdot L,$$

где

$D(\lambda) = M(\lambda) + N(\lambda)$  – коэффициент удельной хроматической дисперсии  $\left( \frac{\text{ПС}}{\text{НМ} \cdot \text{КМ}} \right)$

$$D(\lambda) = M(\lambda) + N(\lambda)$$

$$> 0 \quad > 0$$

$$< 0$$

Длина волны, на которой коэффициент удельной хроматической дисперсии обращается в ноль

$$D(\lambda_0) = 0$$

называется длиной волны нулевой хроматической дисперсии и обозначается  $\lambda_0$ .

Для стандартных кварцевых волокон длина волны нулевой хроматической дисперсии  $\lambda_0 \cong 1310$  нм. В силу технологических допусков производители оптического волокна в паспорте на изделие указывают, например,  $\lambda_0 = 1308 \pm 2$  нм.

Величина хроматической дисперсии зависит от ширины спектра излучателя  $\Delta\lambda$ . Светоизлучающие диоды имеют ширину спектра  $\Delta\lambda_{СИД} = 30 - 50$  нм, у лазерных диодов ширина спектра излучения значительно меньше  $\Delta\lambda_{ЛД} = 0,001 - 4$  нм.

Хроматическая дисперсия линейно нарастает с увеличением длины линии  $L$ . В справочниках обычно всегда приводится значение только коэффициента удельной хроматической дисперсии  $D(\lambda)$ .

$$\tau_{chr} = \Delta\lambda \cdot D(\lambda) \cdot L$$

## Поляризационно-модовая дисперсия

Возникает вследствие неконцентричности сердцевины волокна и рассчитывается по формуле:

$$\tau_{pmd} = T \sqrt{L}, \text{ пс}$$

где  $T$  – коэффициент удельной *pmd*-дисперсии (пс/ $\sqrt{\text{км}}$ ),  
 $L$  – длина линии (км).

На практике коэффициент  $T$  удельной *pmd*-дисперсии лежит в пределах:

$$T = 0,1 \div 0,5 \text{ (пс}/\sqrt{\text{км}}).$$

Поляризационно-модовая дисперсия проявляет себя только на скоростных ВОЛС при скорости передачи от 10 Гбит/с.

## Расчет полной дисперсии в оптической линии

Результирующая дисперсия в общем случае определяется по формуле:

$$\tau_{\Sigma} = \sqrt{\tau_{\text{mod}}^2 + \tau_{\text{chr}}^2 + \tau_{\text{pmd}}^2}, \text{ пс}$$

Для расчета суммарной дисперсии в MMF используется формула:

$$\tau_{\Sigma} = \sqrt{\tau_{\text{mod}}^2 + \tau_{\text{chr}}^2}$$

Для SMF при скоростях передачи до 10 Гбит/с:

$$\tau_{\Sigma} = \tau_{\text{chr}} = \Delta\lambda D L$$

Для SMF при скоростях передачи от 10 Гбит/с и выше необходимо учитывать *pmd*-дисперсию:

$$\tau_{\Sigma} = \sqrt{\tau_{\text{chr}}^2 + \tau_{\text{pmd}}^2}$$

## Требования к широкополосности ВОЛС

Суммарная дисперсия фактически определяет широкополосность ВОЛС – максимальную частоту модуляции сигнала, который может быть передан в линии. Широкополосность ВОЛС определяется по формуле:

$$\Delta f = \frac{0,44}{\tau_{\Sigma}}, \text{ МГц.}$$

Для того, чтобы ВОЛС работала стабильно, широкополосность линии должна выбираться с запасом. Для этого должно выполняться условие

$$\Delta f \geq 1,5 f_{\text{мод}},$$

где  $f_{\text{мод}}$  – частота модуляции сигнала, который предполагается передавать.

Следовательно, предельное значение накопленной суммарной дисперсии в линии не должно превышать

$$\tau_{\Sigma} \leq \frac{0,44}{1,5 f_{\text{мод}}}$$

## Дисперсионные свойства оптических волокон

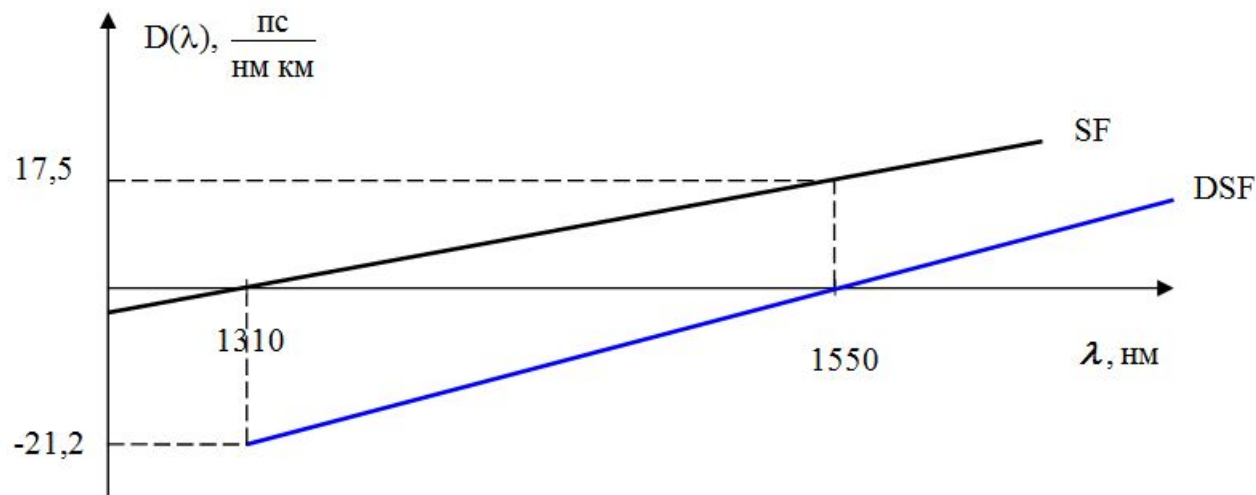


Таблица 1 – Дисперсия оптических сигналов в различных оптических волокнах

Тип волокна	$\lambda$ , нм	Межмодовая дисперсия $\tau_{\text{mod}}$ , пс/км	Удельная хроматическая дисперсия, $D(\lambda)$ , пс/(нм км)
MMF 62,5/125	850	973	106,7
	1310	973	4,2
	1550	973	17,3
MMF 50/125	850	414	99,6
	1310	414	1,0
	1550	414	19,2
SMF 8/125	1310	0	$< 1,85$
	1550	0	17,5
DSF 8/125	1310	0	- 21,2
	1550	0	$< 1,7$

## Дисперсионные свойства оптических волокон

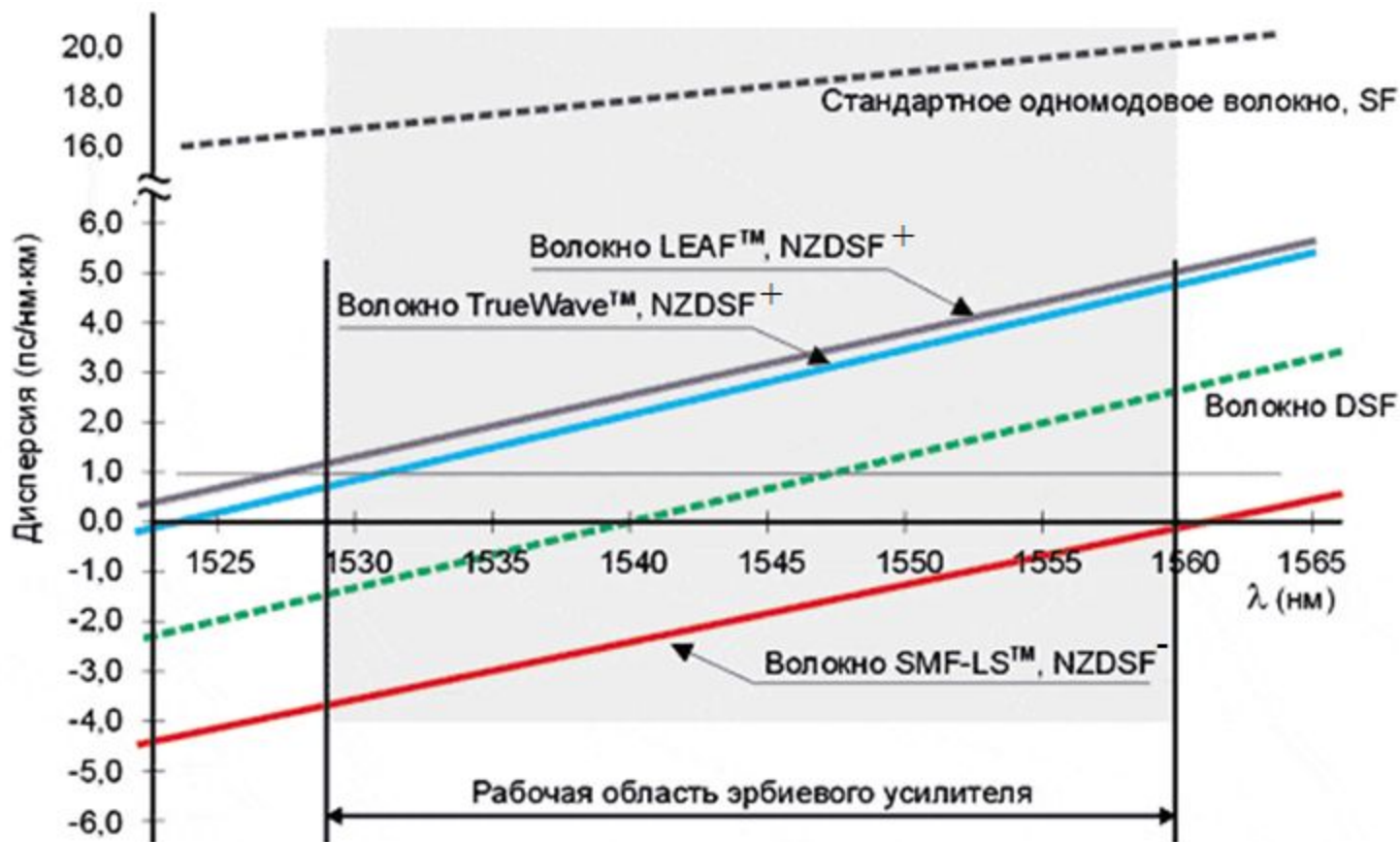


Рис. 6 – Дисперсионные характеристики NZDSF<sup>+</sup> и NZDSF<sup>-</sup> волокон разных производителей

## Методы компенсации дисперсии

В магистральных ВОЛС на основе одномодовых ОВ используют следующие методы компенсации дисперсии:

1. Если оптический кабель проложен, то  $\lambda_p = \lambda_0$ , т.е. выбор рабочей длины работы линии вблизи длины волны нулевой хроматической дисперсии волокна ВОК.
2. Выбор оптических передатчиков с меньшей шириной спектра излучателя:  $\Delta\lambda \downarrow\downarrow$ .
3. Установка на линии пассивных модулей компенсации дисперсии **DCM** (Dispersion Compensating Module).
4. Прокладка ВОЛС на основе последовательного соединения строительных длин кабелей с волокнами NZDSF<sup>+</sup> и NZDSF<sup>-</sup>. Длина кабелей NZDSF<sup>+</sup> и NZDSF<sup>-</sup> выбирается так, чтобы на выходе хроматическая дисперсия была равна нулю (Рис. 8):

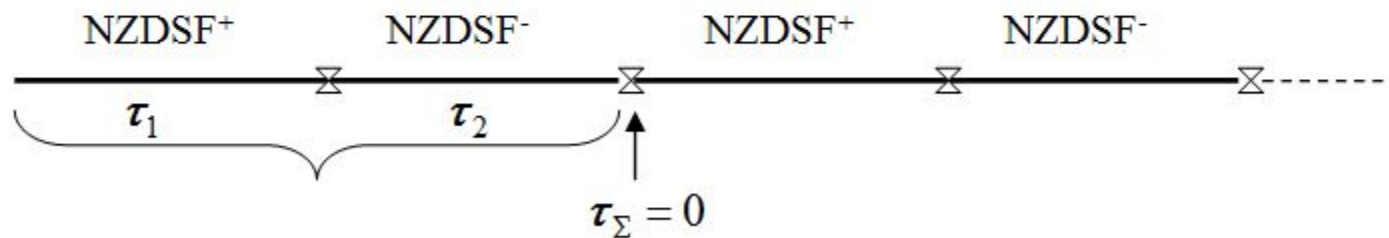


Рис. 8 – Компенсация хроматической дисперсии волокнами NZDSF<sup>+</sup> и NZDSF<sup>-</sup>



## Компенсаторы хроматической дисперсии DCM

Компенсатор хроматической дисперсии DCM – пассивное устройство, предназначенное для компенсации хроматической дисперсии в протяженных линиях связи. Устройства компенсации хроматической дисперсии восстанавливают первоначальную форму импульсов после прохождения сигнала по трассе.

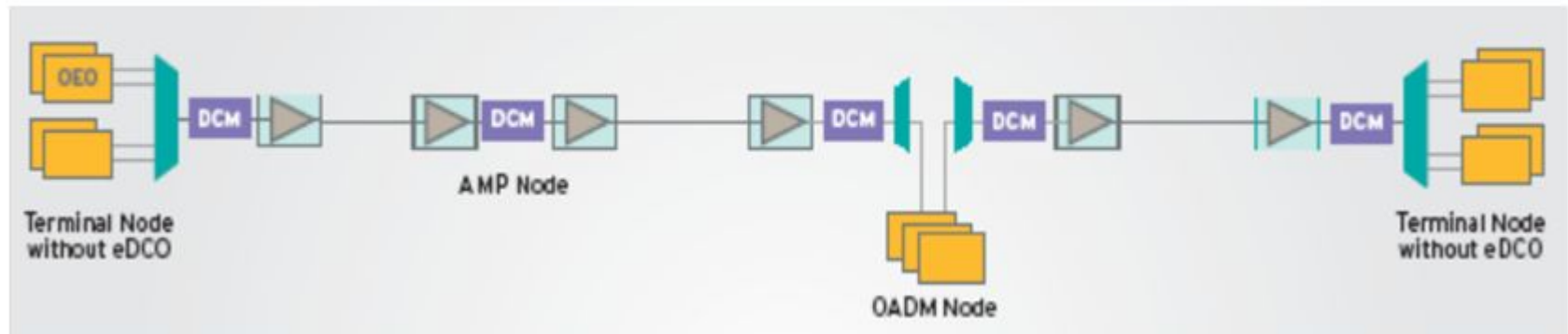


Рис. 9 – Пример ВОЛС с модулями DCM и оптическими усилителями

## Типы DCM:

- *Компенсатор хроматической дисперсии, основанный на волокне с отрицательной хроматической дисперсией – DCM-F (Dispersion Compensation Module on Fiber).*
- *Компенсатор хроматической дисперсии на основе решетки Брэгга – DCM FBG (Dispersion Compensation Module Fiber Bragg Grating).*

Компенсатор **DCM-F** (обычно обозначается просто DCM ) представляет собой катушку оптического волокна, установленную в корпус типа 1U (Рис. 10).



Рис. 10 – Пример модуля DCM в корпусе 1U для коммутационного шкафа

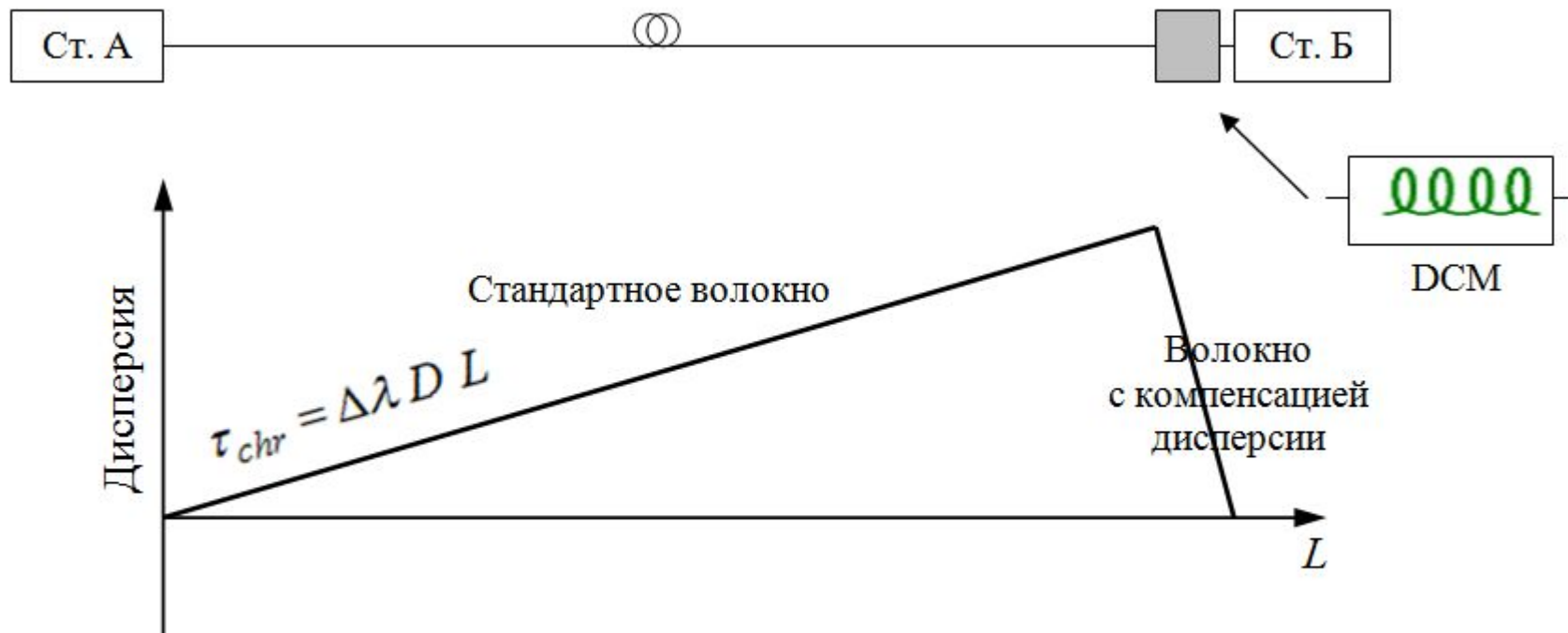


Рис. 11 – Компенсация дисперсии на линии между станциями А и Б модулем DCM

Таблица 2 – Компенсаторы дисперсии на компенсирующем ОВ компании ТелКон  
г. Санкт-Петербург (<https://www.telcon.ru/equipment/dwdm/dcm/>).

Тип DCM	Эквивалентная длина, км	Суммарная хроматическая дисперсия <sup>1</sup> , пс/нм	Вносимое затухание <sup>2</sup> , дБ
<a href="#">TC-DC D10</a>	10	-161	2,1
<a href="#">TC-DC D20</a>	20	-320	2,7
<a href="#">TC-DC D40</a>	40	-641	4,1
<a href="#">TC-DC D60</a>	60	-970	5,5
<a href="#">TC-DC D80</a>	80	-1293	6,9
<a href="#">TC-DC D100</a>	100	-1632	8,4
<a href="#">TC-DC D120</a>	120	-1977	9,8

[1] Без учета потерь на оптических коннекторах.

[2] Значение для длины волны 1550 нм.

**Волоконная решетка Брэгга (FBG)** представляет собой ОВ небольшой длины, показатель преломления сердцевины которого изменяется периодически вдоль продольной координаты. Компенсация дисперсии происходит из-за того, что различные спектральные составляющие оптического импульса отражаются от различных слоев решетки, и проходят разные пути. За счет этого в решетке наблюдается эффект дисперсионного расщепления противоположного знака.

## Компенсаторы дисперсии DCM FBG (на основе решетки Брэгга )

Достоинство – меньшие потери по сравнению с DCM на компенсирующем волокне.

Недостаток – снижен порог максимальной мощности на входе ( $\leq 500$  мВт)

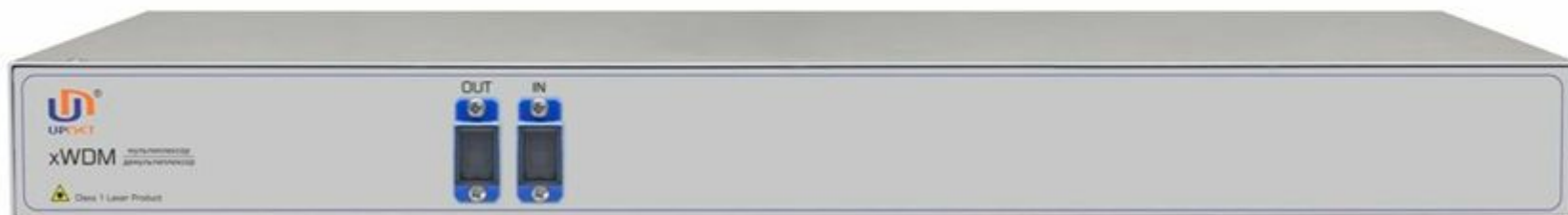


Таблица 3 – Компенсаторы дисперсии на основе решетки Брэгга компании Prointech  
<https://prointech.ru/catalog/oborudovanie-sistem-uplotneniya-dwdm/kompensatory-dispersii-dcm/>

Тип	Метод компенсирования дисперсии	Средняя хроматическая дисперсия, пс/км	Эквивалентная протяженность, км	Максимальные вносимые затухания, дБ
<a href="#">DCM-B020</a>	Fiber Bragg Grating	-340 ±10	20	≤3
<a href="#">DCM-B040</a>	Fiber Bragg Grating	-670 ±20	40	≤3
<a href="#">DCM-B060</a>	Fiber Bragg Grating	-1000 ±30	60	≤3
<a href="#">DCM-B080</a>	Fiber Bragg Grating	-1340 ±40	80	≤3
<a href="#">DCM-B100</a>	Fiber Bragg Grating	-1680 ±50	100	≤3

Поляризационно-модовая дисперсия пассивно не компенсируется. Поэтому на высокоскоростных протяженных ВОЛС, где сказывается поляризационно-модовая дисперсия, применяют активные (электронные) методы компенсации дисперсии.

# Параметры и характеристики ОВ

$$W = \frac{0,44}{\tau_{уд}} \text{ , МГц*км}$$

*Удельная полоса пропускания*

# Параметры и характеристики ОВ

## Дисперсия оптических сигналов в различных оптических волокнах

Тип волокна	$\lambda$ , нм	Межмодовая дисперсия $\tau_{mod}$ , пс/км	Удельная хроматическая дисперсия, $D(\lambda)$ , пс/(нм км)	Результирующая удельная полоса пропускания $W = 0,44 / \tau$ , МГц км $(\tau^2 = \tau_{mod}^2 + \tau_{chr}^2)$		
				$\Delta\lambda = 2$ нм	$\Delta\lambda = 4$ нм	$\Delta\lambda = 35$ нм
MMF 50/125	850	414	99,6	958	766	125
	1310	414	1,0	1062	1062	1050
	1550	414	19,2	1058	1044	540
MMF 62,5/125	850	973	106,7	441	414	114
	1310	973	4,2	452	452	450
	1550	973	17,3	451	450	384
SMF 8/125	1310	0	< 1,85	> 120000	61000	6900
	1550	0	17,5	12600	6300	720
DSF 8/125	1310	0	21,2	10400	5200	594
	1550	0	< 1,7	> 120000	65000	7400

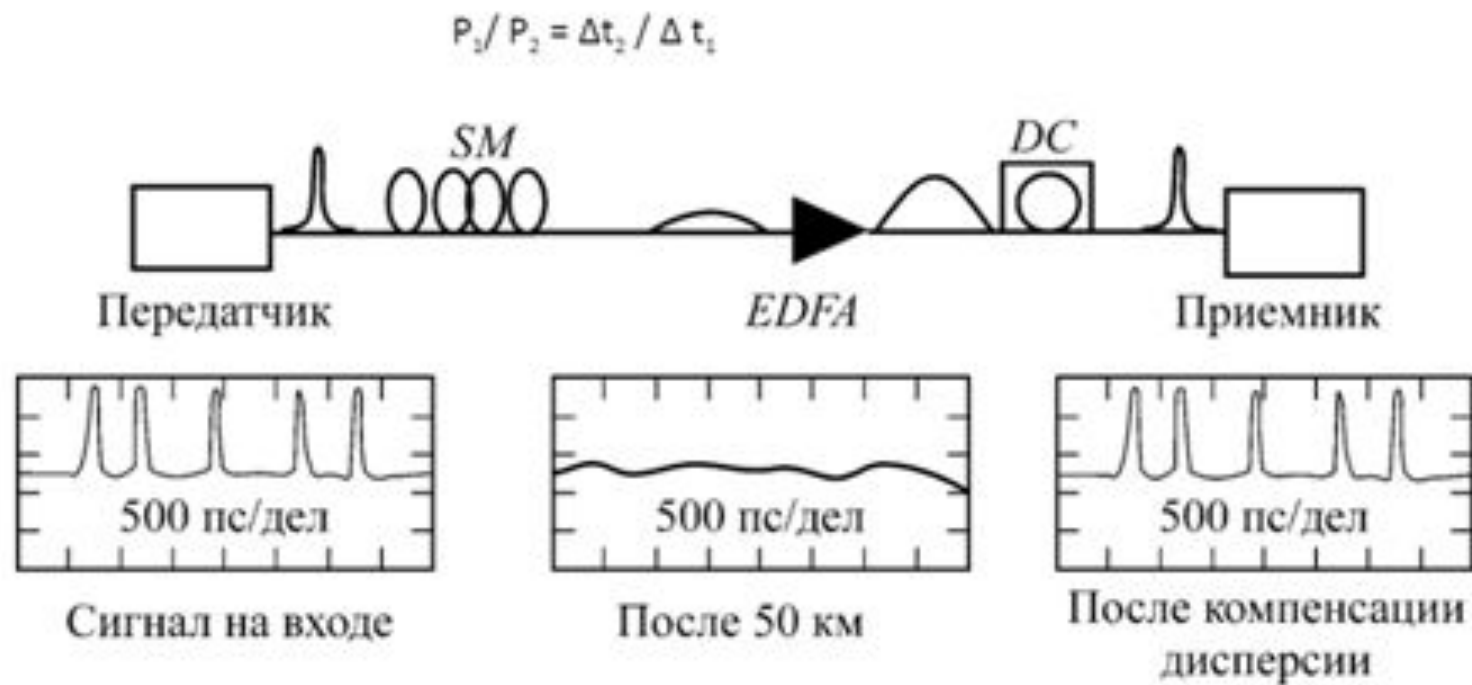


# Параметры и характеристики ОВ

## Параметры волоконных световодов многомодовых оптических кабелей

+

Изготовитель	Страна	Диаметр сердцевины, $\mu\text{м}$	Коэффициент затухания дБ/км, на длине волны		Коэффициент широкополосности, МГц·км, на длине	
			$\lambda = 850$	$\lambda = 1300 \text{ нм}$	$\lambda = 850 \text{ нм}$	$\lambda = 1300$
НП Электропровод	Россия	50	3,3	0,7-1,5		600-800
НП Электропровод	Россия	62,5	3,5	0,7-1,5		
Lucent Technologies	США	50	2,9	0,7-0,8		
Lucent Technologies	США	62,5	3,4	0,7-0,8	200	500
ЗАО «СОКК»	Россия	62,5	3,5	1,0-1,25	160	500
ЗАО «СОКК»	Россия	50	3,0	1,0-1,2	400	400
Nokia	Финлянди	62,5	3,6	0,7-1,5	160-200	200-600
Nokia	Финлянди	50	2,8	0,6-1,2	200-800	400-1500
Nokia	Финлянди	100	4,0	2,5-3,5	100-500	100-300
ЗАО «Москабель»	Россия	50	3,0	1,1-2,0	400	800
ЗАО «Москабель»	Россия	62,5	3,2	0,9-1,0	160-200	500-600
ОАО	Россия	50	2,8	1,0-1,4	400-600	400-1000
ОАО	Россия	62,5	3,4	1,0-1,5	160-200	500-600
ЗАО «Севкабель-ОПНКО»	Россия	50	2,7	0,9	200	600



Прохождение импульсов (2,5 Гбит/с), полученных при прямой модуляции, лазера в линии со стандартным одномодовым ОВ