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

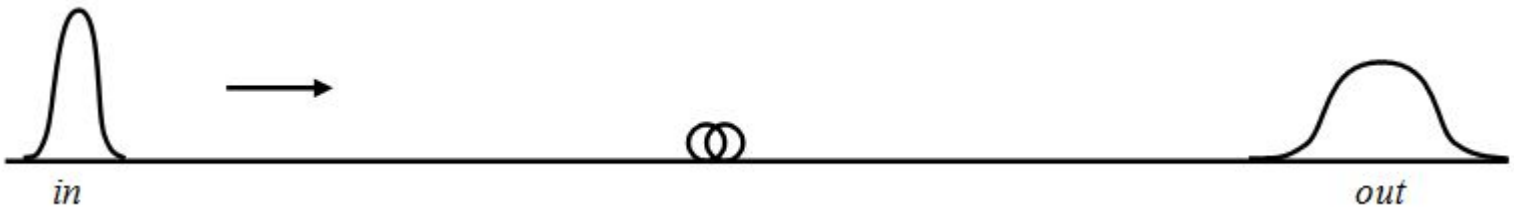


Рис. 1 – Изменение формы оптического импульса при распространении в ОВ

Дисперсия *τ* – уширение импульсов (пс):

$$\tau = \sqrt{\tau_{out}^2 - \tau_{in}^2}$$

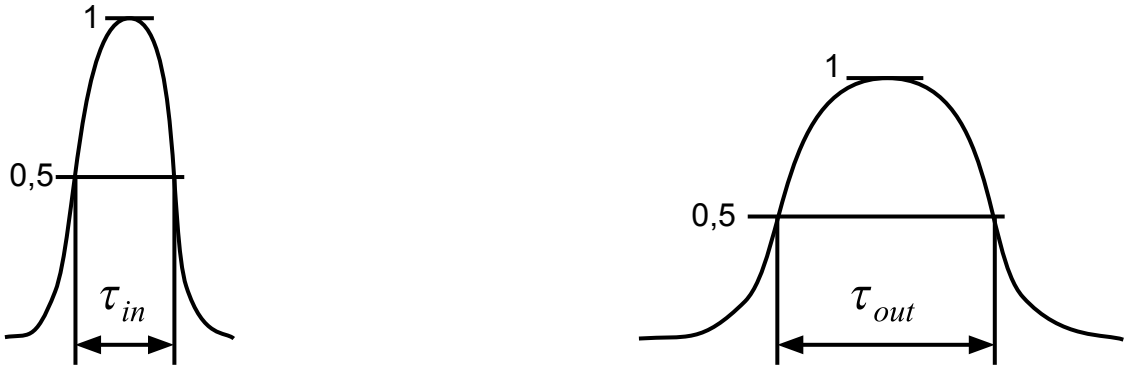


Рис. 2 – К определению дисперсии

Дисперсия оптических сигналов в ОВ

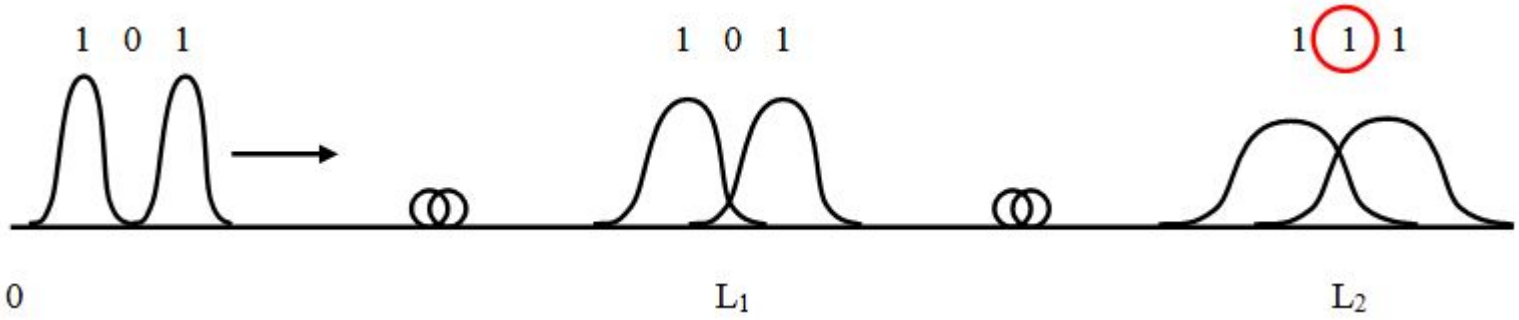
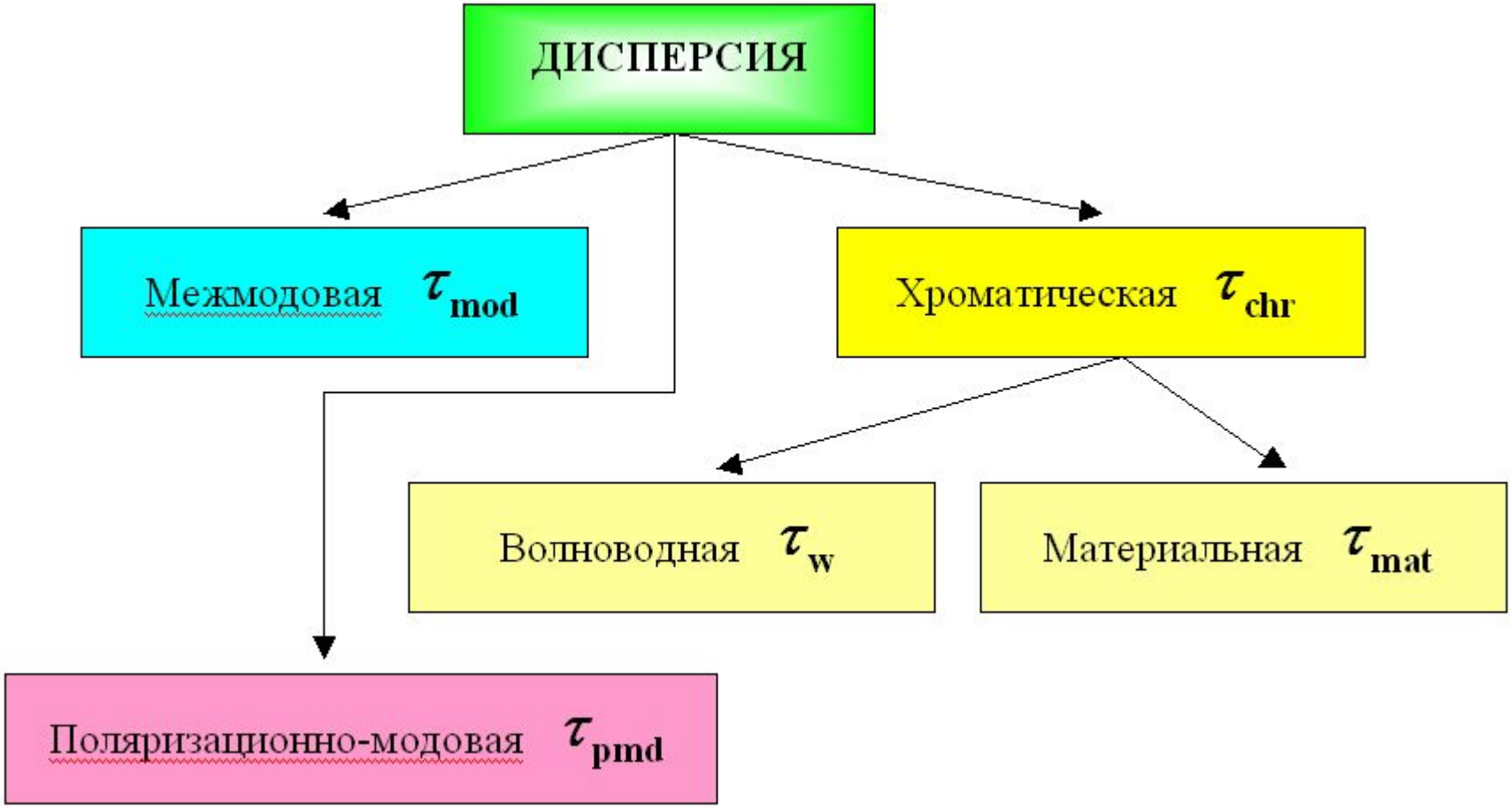


Рис. 3 – Возникновение битовых ошибок

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 L2>L1 необходимо понизить скорость передачи данных).



Дисперсия (dispersion)

Межмодовая дисперсия

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

$$\tau_{\text{mod}} = \tau_{\text{mod } уд} L, \, nc$$

где

$\tau_{\text{mod} уд}$ – удельная межмодовая дисперсия волокна (пс/км);

L – длина линии (км).

Тип волокна	λ, нм	Межмодовая дисперсия τ_{mod}, пс/км
MMF 50/125	850	414
	1310	414
	1550	414
MMF 62,5/125	850	973
	1310	973
	1550	973

Хроматическая дисперсия

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

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

Хроматическая дисперсия:

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

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

где

$D(\lambda) = M(\lambda) + N(\lambda)$ – коэффициент удельной хроматической дисперсии $\left(\frac{\text{пс}}{\text{нм} \cdot \text{км}}\right)$

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

$$> 0 \qquad > 0$$

$$< 0$$

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

$$D(\lambda_0) = 0$$

называется ***длиной волны нулевой хроматической дисперсии*** и обозначается λ_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 $\left(\text{пс}/\sqrt{\text{км}}\right)$,

L – длина линии (км).

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

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

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:

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

Для расчета суммарной дисперсии в MMF используется формула:

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

Для SMF при скоростях передачи до 10 Гбит/с:

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

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

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

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

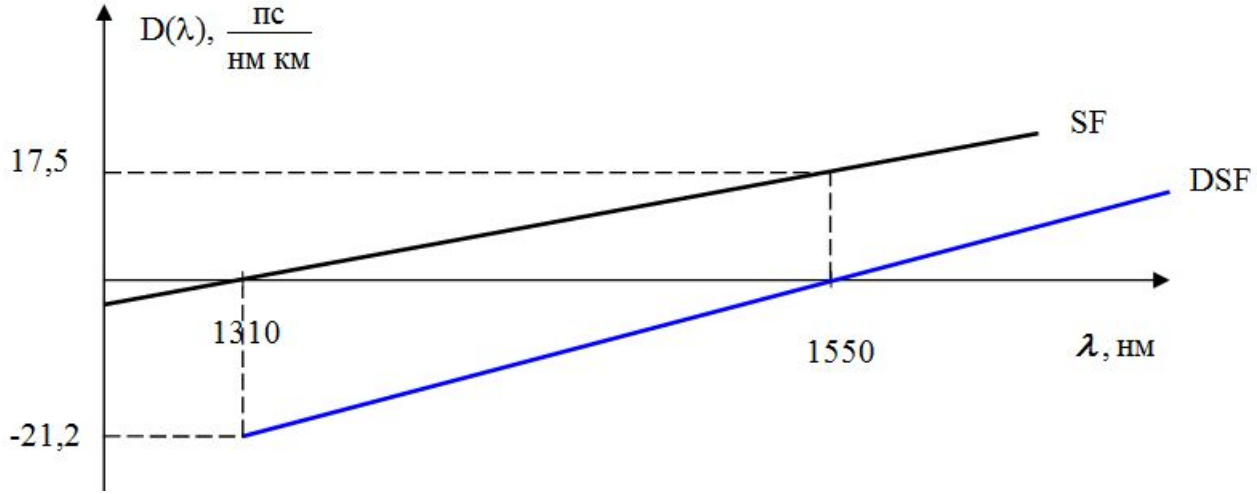


Таблица 1 – Дисперсия оптических сигналов в различных оптических волокнах

Тип волокна	λ, нм	Межмодовая дисперсия τ_{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

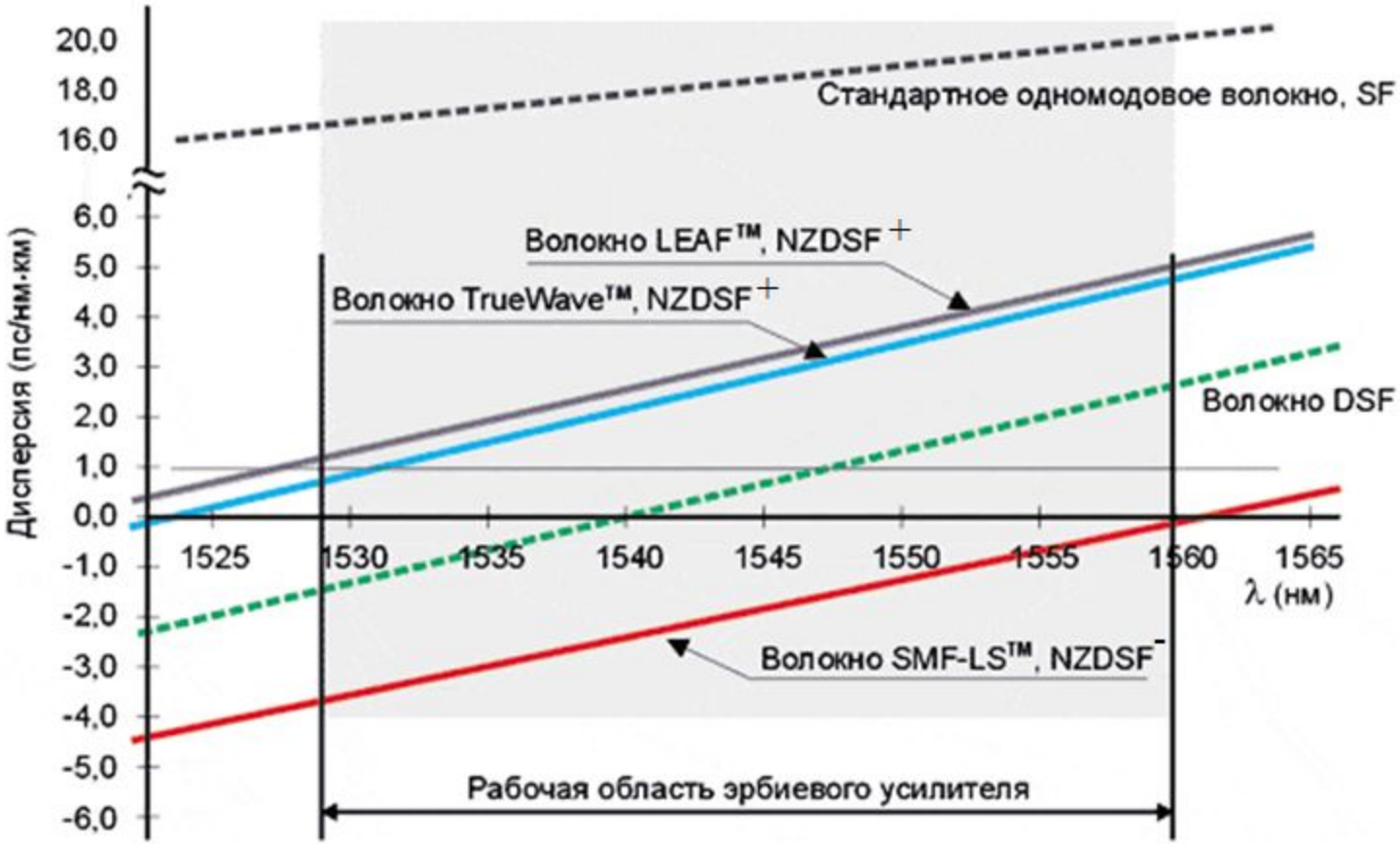


Рис. 6 – Дисперсионные характеристики NZDSF^{+} и NZDSF^{-} волокон разных производителей

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$^+$ и NZDSF$^-$. Длина кабелей NZDSF$^+$ и NZDSF$^-$ выбирается так, чтобы на выходе хроматическая дисперсия была равна нулю (Рис. 8):

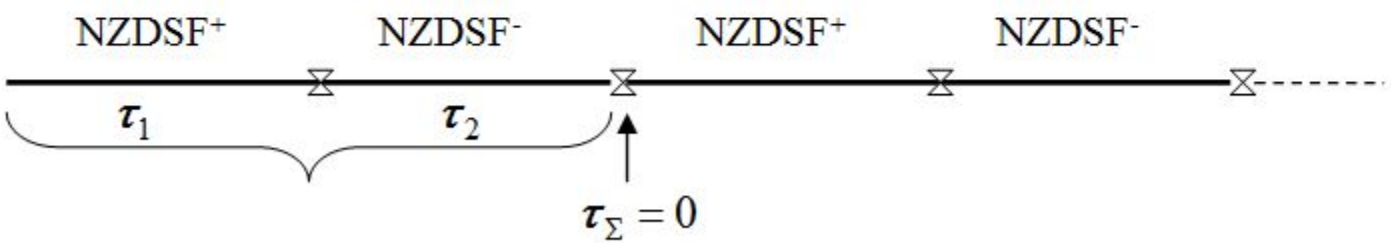


Рис. 8 – Компенсация хроматической дисперсии волокнами NZDSF$^+$ и NZDSF$^-$

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.

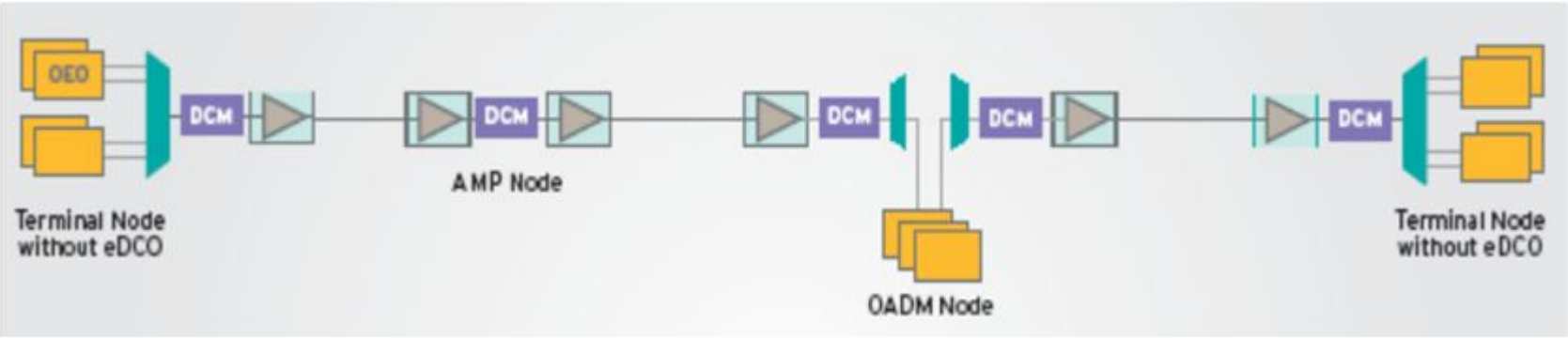


Рис. 9 – Пример ВОЛС с модулями DCM и оптическими усилителями

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

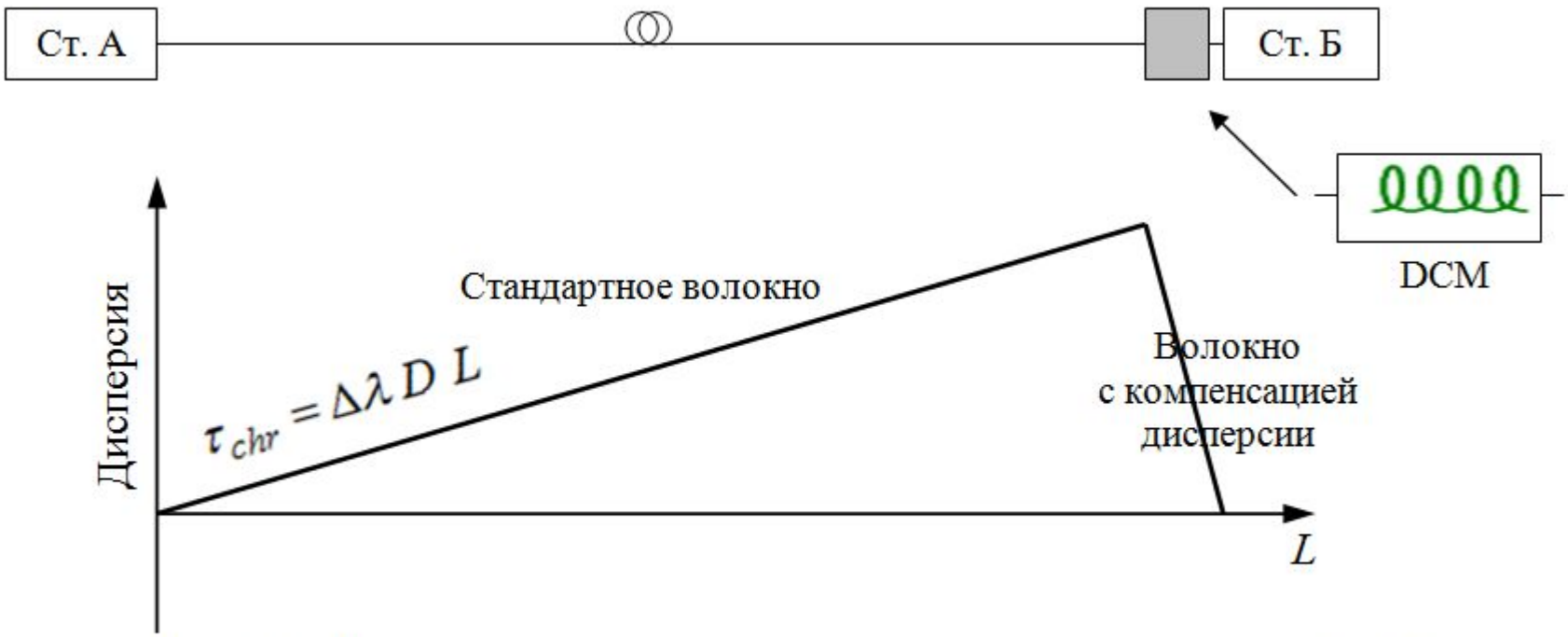


Рис. 11 – Компенсация дисперсии на линии между станциями А и Б модулем DCM

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[1], пс/нм	Вносимое затухание[2], дБ
TC-DC D10	10	-161	2,1
TC-DC D20	20	-320	2,7
TC-DC D40	40	-641	4,1
TC-DC D60	60	-970	5,5
TC-DC D80	80	-1293	6,9
TC-DC D100	100	-1632	8,4
TC-DC D120	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 (≤ 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
DCM-B020	Fiber Bragg Grating	-340 ±10	20	≤3
DCM-B040	Fiber Bragg Grating	-670 ±20	40	≤3
DCM-B060	Fiber Bragg Grating	-1000 ±30	60	≤3
DCM-B080	Fiber Bragg Grating	-1340 ±40	80	≤3
DCM-B100	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

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

;

Удельная полоса пропускания

Параметры и характеристики ОВ

Дисперсия оптических сигналов в различных оптических волокнах

Тип волокна	λ, нм	Межмодовая дисперсия τ_{mod}, пс/км	Удельная хроматическая дисперсия, $D(\lambda)$, пс/(нм км)	Результирующая удельная полоса пропускания $W = 0{,}44/\tau$, МГц·км $\left(\tau^2 = \tau_{mod}^2 + \tau_{chr}^2\right)$		
				$\Delta\lambda = 2$ 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

;

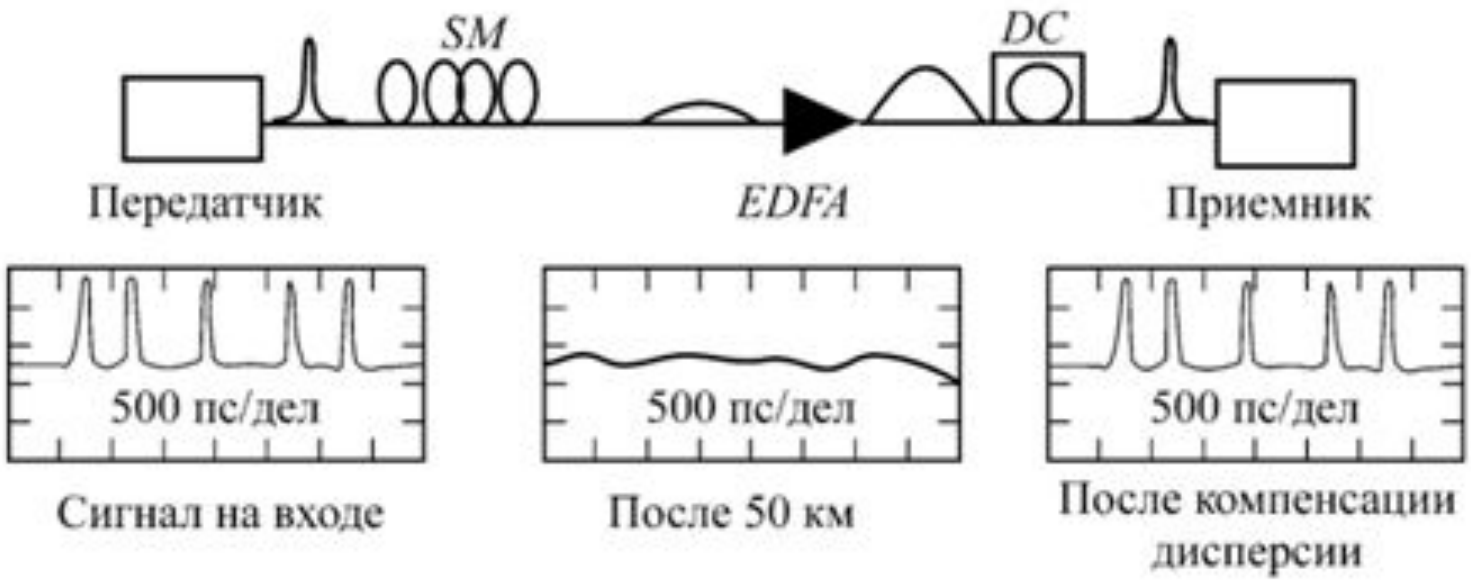
Параметры и характеристики ОВ

Параметры волоконных световодов многомодовых оптических кабелей

Изготовитель	Страна	Диаметр сердцевины, мкм	Коэффициент затухания дБ/км, на длине волны		Коэффициент широкополосности, МГц·км, на длине	
			$\lambda = 850$	$\lambda = 1300$ нм	$\lambda = 850$ 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-оптик»	Россия	50	2,7	0,9	200	600

;

$P_3 / P_2 = \Delta t_2 / \Delta t_1$



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