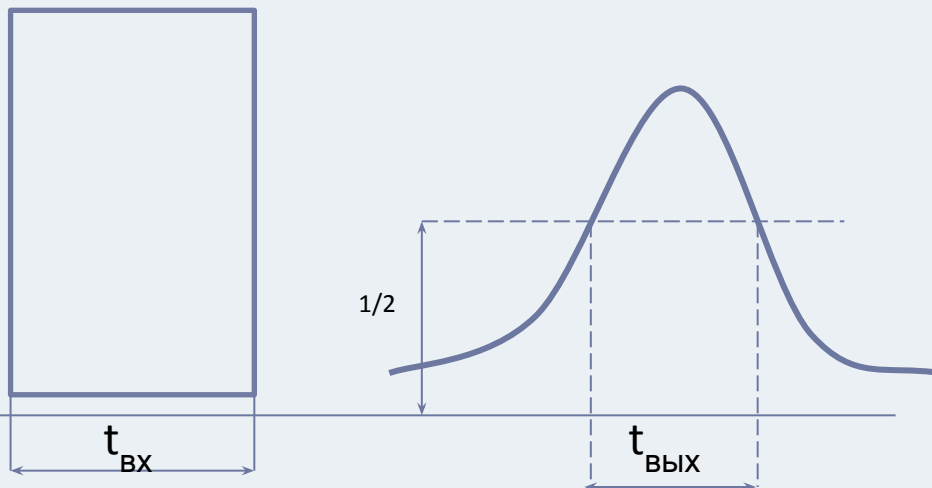


# Дисперсионные искажения

## СИГНАЛОВ

Одним из важных явлений процесса распространения импульсных сигналов по оптическим кабелям является дисперсия – рассеяние во времени спектральных и модовых (характеристик) составляющих оптических сигналов. В результате дисперсии импульсный сигнал на вход приемного устройства приходит тем более искаженным, чем больше линия



$\Delta F$  – определяет объем передаваемой информации

$$\tau = \sqrt{t_{\text{вых}}^2 - t_{\text{вх}}^2}, \text{ с.}$$

$$\Delta F = \frac{1}{\tau}, \text{ Гц} * \text{км}$$

Дисперсия приводит к увеличению длительности импульса (уширение импульса) при его прохождении по оптическому кабелю, межсимвольных помех, и в конечном счете – к ограничению пропускной способности кабеля.

Дисперсионные искажения имеют характер фазовых искажений сигнала и обусловлено различием времени распространения различных мод в световоде и наличием частотной зависимости показателя преломления.

# Модовая дисперсия

Разные моды имеют различную скорость распространения. В геометрической интерпретации соответствующие модам лучи идут под разными углами, проходят различный путь в сердцевине волокна, и следовательно, поступают на выход с различной задержкой.

В кабелях со ступенчатыми волокнами модовая дисперсия определяется:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{\text{мод}} = \frac{\Delta n_1}{c} * l, \text{ при } l \leq l_c \\ \tau_{\text{мод}} = \frac{\Delta n_1}{c} * \sqrt{l * l_c}, \text{ при } l \geq l_c \end{array} \right.$$

где  $c$  – скорость света ( $c=3*10^8$  км/ч)

$l$  – длина оптического волокна

$l_c$  – длина связи мод ( $l_c=5-7$  км для СОВ) – это длина ОВ, после прохождения которой в результате взаимного преобразования мод на нерегулярностях (обмен энергии между модами и их высвечивание) соотношение между мощностями различных мод становится практически постоянным. Модовая дисперсия в этом случае возрастает уже не по линейному, а по корень - квадратичному закону.

В кабелях с градиентными волокнами модовая дисперсия определяется :

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{\Delta^2 n_1}{2c} * l, \text{ при } l \leq l_c$$

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{\Delta^2 n_1}{2c} * \sqrt{l * l_c}, \text{ при } l \geq l_c$$

Лучевая модель иллюстрирующая механизмы возникновения модовой дисперсии в ступенчатых (а) и градиентных (б) волокнах (рисунок 1)

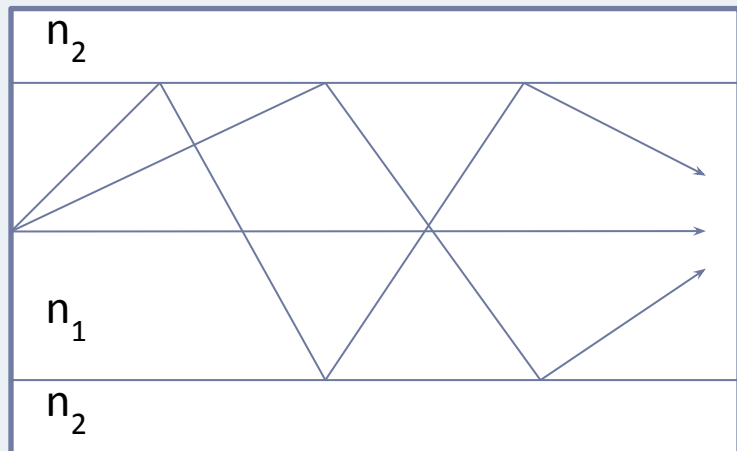


Рисунок 1а

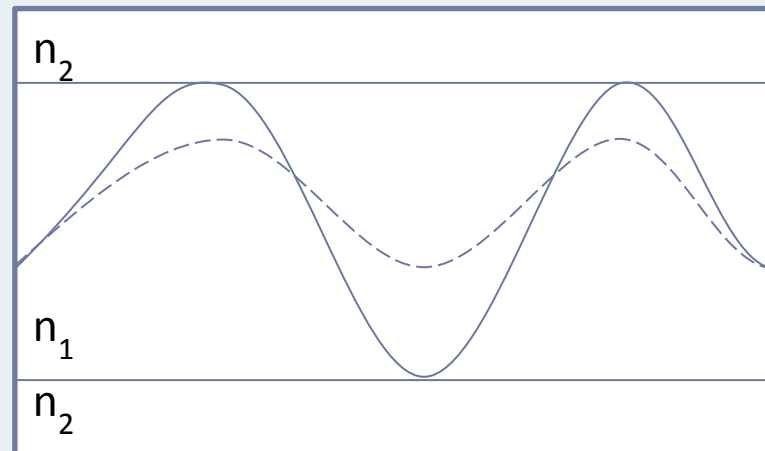


Рисунок 1б

В целом задержка мод оказывается приблизительно одинаковой, а уширение импульсов по сравнению со ступенчатыми волокнами снижается более чем в 10 раз.

# Хроматическая (частотная) дисперсия

Данная дисперсия вызвана наличием спектра частот у источника излучения, характером диаграммы направленности и его некогерентностью. Она делится на материальную, волноводную и профильную (для реальных волокон)

# Материальная дисперсия

Данная дисперсия объясняется тем, что коэффициент преломления стекла изменяется с длиной волны  $n=\phi(\lambda)$ , а практически любой, даже лазерный источник излучения генерирует не на одной длине волны ( $\lambda$ ), а в определенном спектральном диапазоне ( $\Delta \lambda$ ). В результате различные спектральные составляющие передаваемого оптического сигнала имеют различную скорость распространения, что приводит к их различной задержке на выходе волокна.

Из-за узкой полосы Излучаемых длин волн у лазерных источников излучения данный вид дисперсии оказывается незначительно, а в некогерентных источниках (СИДах) – полоса пропускания существенно шире, и эта дисперсия проявляется достаточно значительно.

Для инженерных расчетов используют упрощенную формулу, не учитывающую форму профиля показателя преломления (для идеального ступенчатого ППП):

$$\tau_{\text{мат}} = \Delta \lambda * l * M(\lambda),$$

где :  $\Delta \lambda$  – ширина спектра излучения источника обычно соответствует 1-3 нм для лазера и 20-40 нм для СИД;

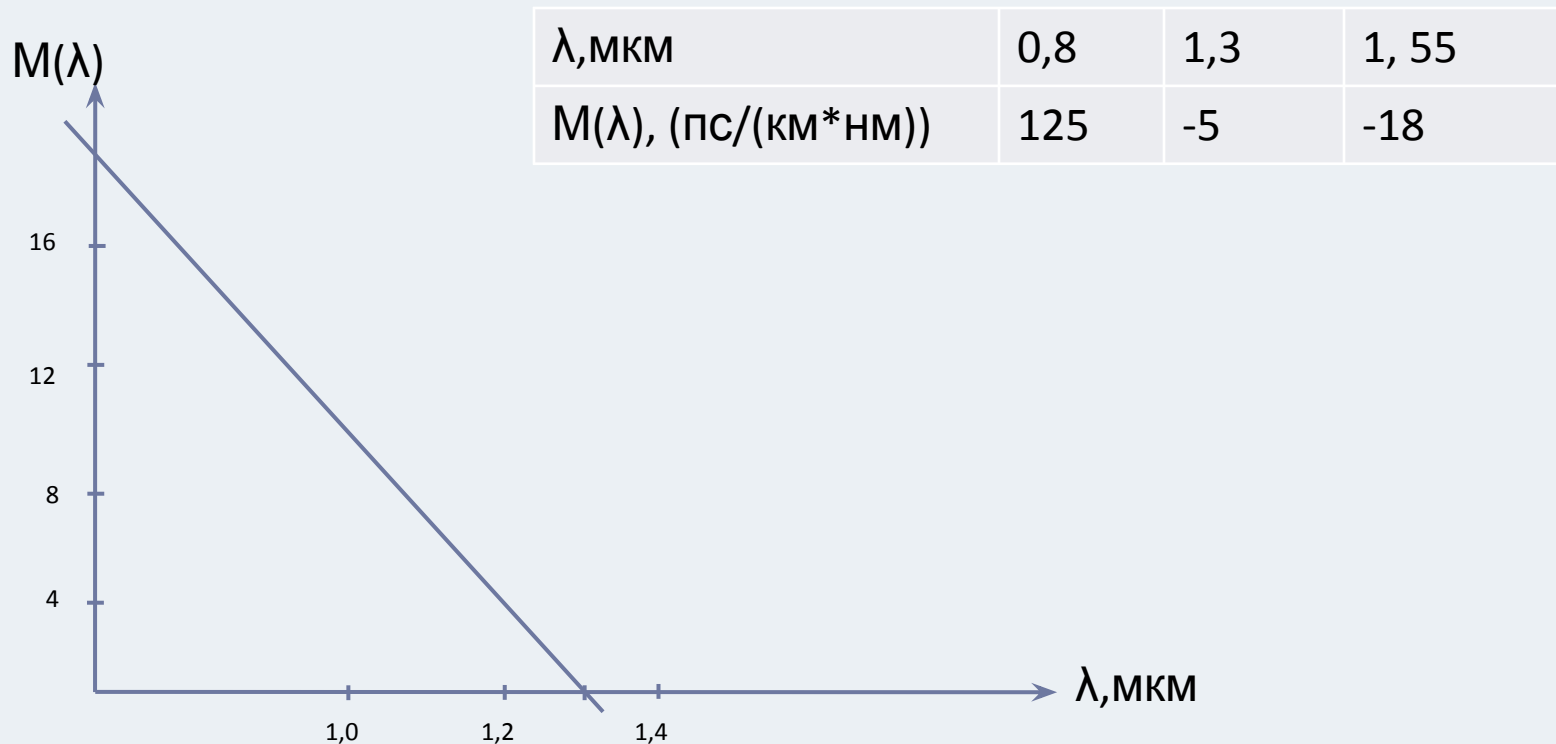
$M(\lambda)$  – удельная материальная дисперсия (пс/(км\*нм))

$l$  – длина линии, км.

С увеличением длины волны значение  $\tau_{\text{мат}}$  уменьшается, а затем проходит через нуль и приобретает минусовое значение.



Знак и величина материальной дисперсии зависят от материала, используемого для изготовления ОВ. Для кварцевого стекла  $M(\lambda)$  имеет зависимость:



# Волноводная (внутримодовая) дисперсия

Обусловлена процессами внутри моды. Она характеризуется зависимостью коэффициента распространения моды от длины волны  $\gamma = \phi(\lambda)$ . Являясь составной частью хроматической дисперсии, волноводная дисперсия зависит от ширины передаваемого спектра частот.

Для инженерных расчетов используется упрощенная формула:

$$T_{\text{ВВ}} = \Delta \lambda * l * V(\lambda)$$

где  $V(\lambda)$  – удельная волноводная дисперсия, пс/км\*нм;

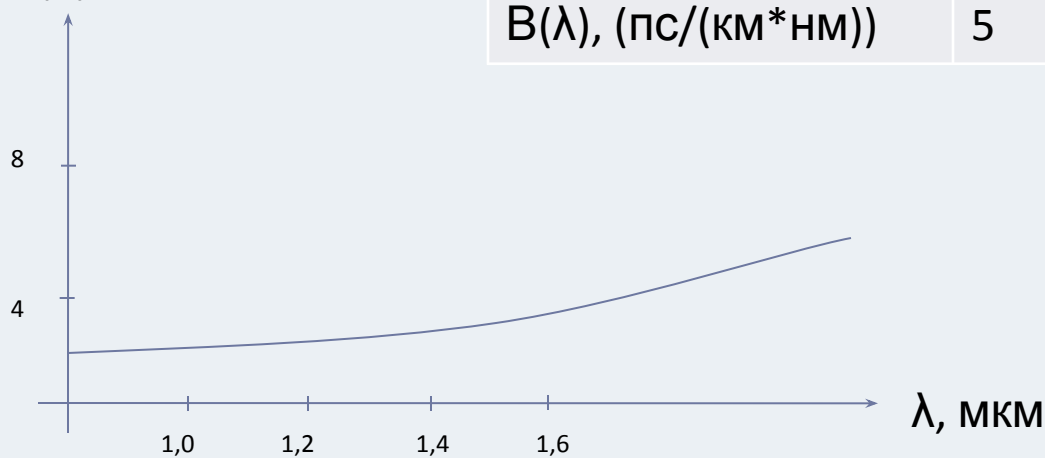
$\Delta \lambda$  – ширина спектра излучения источника, нм;

$l$  – длина линии, км.

Вблизи длины волны  $\lambda = 1,35$  мкм происходит взаимная компенсация материальной и волновой дисперсии

$V(\lambda)$  характеризуется направляющими свойствами сердцевины ОВ; зависимостью групповой скорости моды от длины волны, это приводит к различию скоростей распространения частотных составляющих излучаемого спектра. Поэтому внутримодовая дисперсия, в первую очередь определяется профилем показателя преломления ОВ и пропорциональна ширине спектра излучения источника  $\Delta\lambda$ .

$V(\lambda)$



$\lambda, \text{мкм}$

0,8

1,3

1,55

$V(\lambda), (\text{пс}/(\text{км} \cdot \text{нм}))$

5

8

12

8

4

1,0

1,2

1,4

1,6

$\lambda, \text{мкм}$

# Профильная дисперсия

Профильная дисперсия обусловлена отклонением геометрических размеров волокна от номинальных значений.

Основные причины: поперечные и продольные малые отклонения (флуктуация) геометрических размеров и формы волокна (на пример, небольшая эллиптичность поперечного сечения волокна); изменения границы профиля ПП; осевые и внеосевые провалы ППП, вызванные особенностями технологии изготовления ОВ.

Для инженерных расчетов профильной дисперсии используется следующая формула

$$T_{\text{пр}} = \Delta\lambda * l * P(\lambda),$$

где  $P(\lambda)$  – удельная профильная дисперсия, пс/км \* нм;  
 $\Delta\lambda$  – ширина спектра излучения источника, нм;  
 $l$  – длина линии, км.

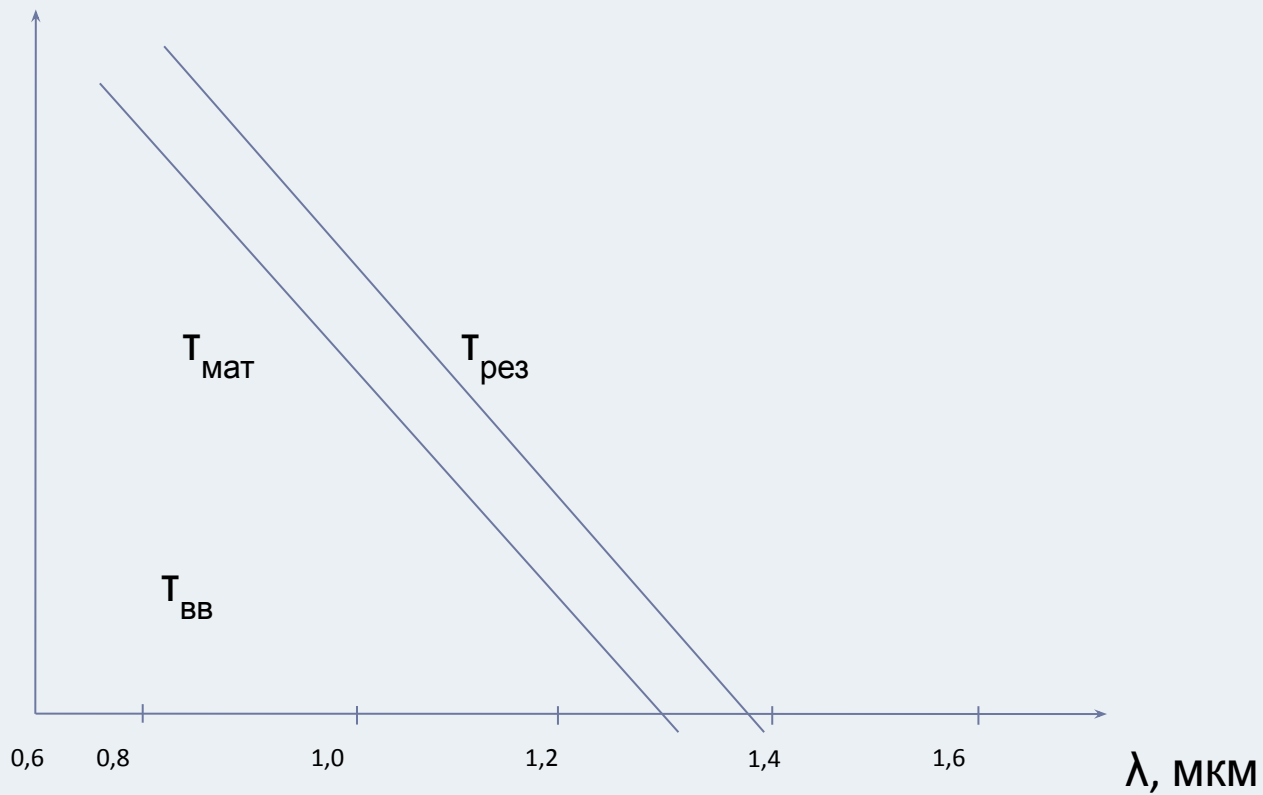
Продольные флуктуации могут возникать в процессе изготовления ОВ и ОК, строительства и эксплуатации ВОЛС. В ряде случаев профильная дисперсия может оказать существенное влияние на общую дисперсию. Профильная дисперсия может появляться как в многомодовых, так и в одномодовых ОВ.

Результирующее значение дисперсии определяется по формуле:

$$\tau_{рез} = \sqrt{\tau_{мод}^2 + \tau_{хр}^2} = \sqrt{\tau_{мод}^2 + (\tau_{мат} + \tau_{вв} + \tau_{пр})^2}, с.$$

$\lambda, \text{мкм}$	0,6	08	1,3	1,55
$\tau(\lambda), (\text{пс}/(\text{км} \cdot \text{нм}))$	0	125	-5	-18

$\tau(\text{пс}/(\text{км} \cdot \text{нм}))$



# Дисперсионные свойства различных ОВ

Вид дисперсии	Причина дисперсии	Многомодовое ОВ		
		ступенчатое	градиентное	одномодовое ОВ
Модовая	Разные моды приходят к концу линии в разное время	20÷50 нс/км	1-4нс/км	отсутствует
Волноводная	Коэффициент распространения зависит от частоты	Малое значение	Малое значение	Взаимная компенсация
Материальная	Показатель преломления зависит от частоты	2-5 нс/км	0,1÷0,3 нс/км	