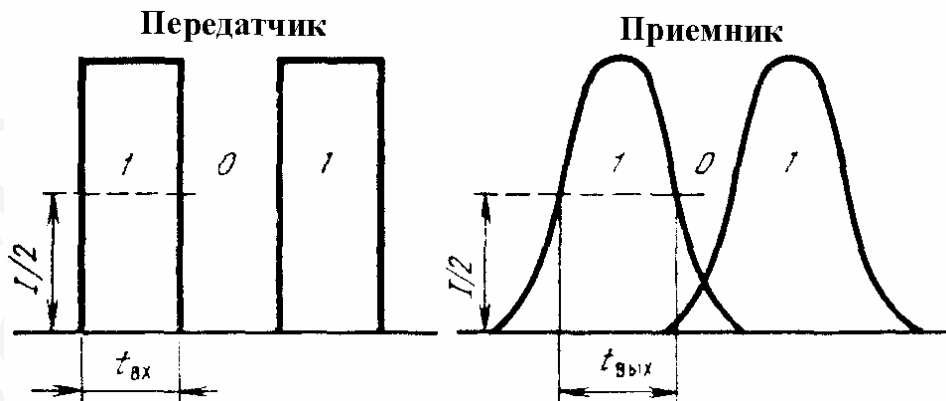


Дисперсия и пропускная способность световодов

Пропускная способность ΔF – важнейший параметр волоконно-оптических систем передачи – определяет полосу частот, пропускаемую световодом, и соответственно объем передаваемой информации.

Связь между дисперсией τ [нс/км] и пропускной способностью ΔF [МГц·км] приближенно выражается соотношением $\Delta F = 1/\tau$.



Дисперсия τ – это

рассеяние во времени спектральных или модовых составляющих оптического сигнала, приводящее к уширению импульса на приемной стороне. Величина уширения определяется как квадратичная разность длительности импульсов

на выходе $t_{\text{ВЫХ}}$ и входе кабеля $t_{\text{ВХ}}$:

$$\tau = \sqrt{t_{\text{ВЫХ}}^2 - t_{\text{ВХ}}^2},$$

где значения $t_{\text{ВЫХ}}$ и $t_{\text{ВХ}}$ берутся на уровне половины амплитуды импульсов.

Дисперсия не только ограничивает пропускную способность световодов, но и существенно снижает дальность передачи, т.к. чем длиннее линия, тем больше проявляется дисперсия и больше уширение импульса.

Пропускная способность *зависит* от:

- типа и свойств световодов (одномодовые, многомодовые, градиентные);
- типа излучателя (лазер, светодиод).

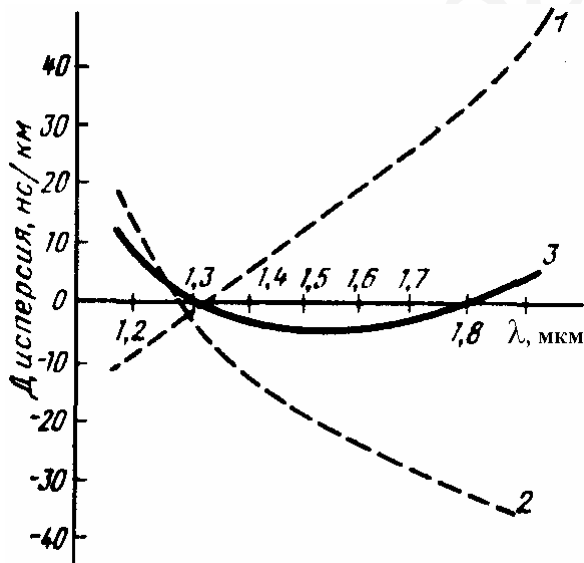
Дисперсия возникает по двум причинам:

– существование большого числа мод N – межмодовая дисперсия – обусловлена тем, что каждая мода распространяется со своей скоростью $v = \psi_1(N)$.

– некогерентность источников излучения и появление спектра $\Delta\lambda$ – хроматическая (частотная) дисперсия (кривая 3); делится на:

– волноводную (внутримодовую) (кривая 1) – обусловлена процессами внутри моды и связана с ее световой структурой; характеризуется зависимостью коэффициента распространения моды от длины волны $\gamma = \psi_2(\lambda)$;

– материальную (кривая 2) – обусловлена зависимостью показателя преломления от длины волны $n = \psi_3(\lambda)$.



Дисперсии проявляются по-разному в различных типах световодов.

В *ступенчатых* световодах при многомодовой передаче доминирует межмодовая дисперсия, достигающая больших значений (15...30 нс/км).

В *одномодовых ступенчатых* световодах межмодовая дисперсия отсутствует. Здесь проявляются волноводная и материальная дисперсии, но они почти равны по абсолютной величине и противоположны по фазе в широком спектральном диапазоне. В силу этого происходит их взаимная компенсация и результирующая дисперсия при $\lambda = 1,3...1,8$ мкм не превышает 1 нс/км.

В *градиентных* световодах происходит выравнивание времени распространения различных мод и определяющим является дисперсия материала, которая уменьшается с увеличением длины волны. По абсолютной величине она колеблется в пределах 3...5 нс/км.

Наименьшей дисперсией обладают одномодовые световоды. Хорошие данные также у градиентных световодов с плавным профилем. Наиболее резко дисперсия проявляется у ступенчатых многомодовых световодов.

Дисперсионные свойства тракта передачи также зависят от источника излучения. Для лазерных источников, благодаря узкому спектру излучения, дисперсия практически не проявляется. Для светодиодов за счет более широкого спектра излучения дисперсия проявляется довольно значительно.

Суммарное уширение импульсов за счет дисперсии определяется как:

$$\tau = \sqrt{\tau_{\text{ММ}}^2 + (\tau_{\text{ВВ}} + \tau_{\text{МТ}})^2},$$

где: $\tau_{\text{ММ}}$ – уширение за счет межмодовой дисперсии; определяется как разность времени прохождения единицы длины волокна различными модами:

для ступенчатого профиля

$$\tau_{\text{ММ}} = \Delta n_1 \ell / c = \text{NA}^2 \ell / (2n_1 c);$$

для градиентного профиля

$$\tau_{\text{ММ}} = \Delta^2 n_1 \ell / (2c) = \text{NA}^4 \ell / (8n_1^3 c),$$

где ℓ – длина световода; Δ – соотношение коэффициентов преломления;

$\tau_{\text{ВВ}}$ – уширение за счет волноводной дисперсии; определяется как разность времени распространения волн по сердцевине и оболочке:

$$\tau_{\text{ВВ}} = (\Delta\lambda/\lambda)(2n_1^2 \Delta \ell / c),$$

где $\Delta\lambda/\lambda$ – относительная ширина спектра излучения;

τ_{MT} – уширение за счет материальной дисперсии; определяется как разность времени прохождения по волокну излучения различных длин волн:

$$\tau_{\text{MT}} = (\Delta\lambda/\lambda)(\lambda^2/c)(d^2n/d\lambda^2)\ell.$$

С учетом реального соотношения вкладов отдельных видов дисперсий для многомодовых волокон $\tau = \tau_{\text{MM}}$, а для одномодовых $\tau = \tau_{\text{BB}} + \tau_{\text{MT}}$.

Пропускная способность градиентного световода в $2/\Delta$ раз выше, чем у ступенчатого при одинаковом Δ . Учитывая, что величина Δ составляет около 1%, различие пропускной способности может достигать двух порядков.

Явление дисперсии приводит как к ограничению пропускной способности оптических кабелей, так и к снижению дальности передачи по ним.

Полоса частот ΔF и дальность передачи ℓ взаимосвязаны:

– для *коротких линий*:

$$\Delta F / \Delta F_x = \ell_x / \ell \rightarrow \Delta F_x = \Delta F \ell / \ell_x ; \ell_x = \Delta F \ell / \Delta F_x ,$$

где значения с индексом x являются искомыми, а без него – заданными;

– для *длинных линий* (примерно свыше 8 км), в которых процесс распространения волны является установившимся:

$$\Delta F / \Delta F_x = \sqrt{\ell_x / \ell} \rightarrow \Delta F_x = \Delta F \sqrt{\ell / \ell_x} ; \ell_x = \ell (\Delta F / \Delta F_x)^2 .$$

Таким образом, увеличение длины кабеля приводит к снижению полосы частот и пропускной способности системы, и в свою очередь расширение полосы частот резко ограничивает дальность передачи по кабелю.

Пропускная способность и дальность передачи по оптическим кабелям лимитируется не только дисперсией, но и затуханием световодов.

Дальность связи и длина регенерационного участка

Применительно к цифровыми оптическим линиям связи, у которых в регенераторах сигнал полностью восстанавливается и помехи не накапливаются, общая дальность передачи может быть достаточно большой, но при этом важно правильно выбрать длину регенерационного участка, которая определяется:

– *затуханием* α – приводит к уменьшению передаваемой мощности:

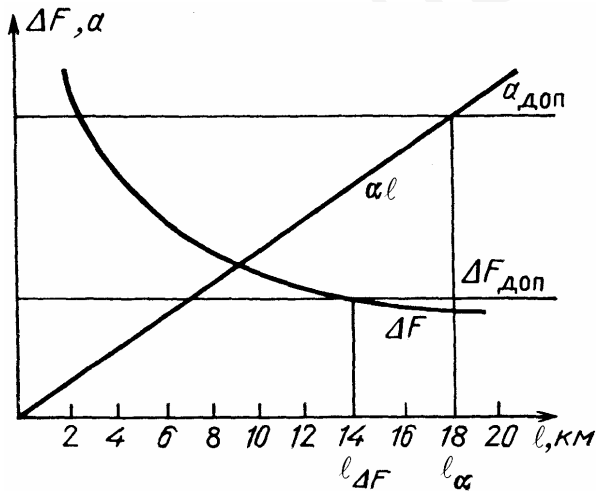
$$a = \alpha l_x, \text{ [дБ]},$$

где α – коэффициент затухания [дБ/км];

– *дисперсией* τ – приводит к уширению передаваемых импульсов и накладывает ограничения по пропускной способности ΔF :

$$\Delta F_x = \Delta F l / l_x \text{ или } \Delta F_x = \Delta F \sqrt{l / l_x},$$

где $\Delta F = 1/\tau$ [Гц·км]; τ – дисперсия [нс/км].



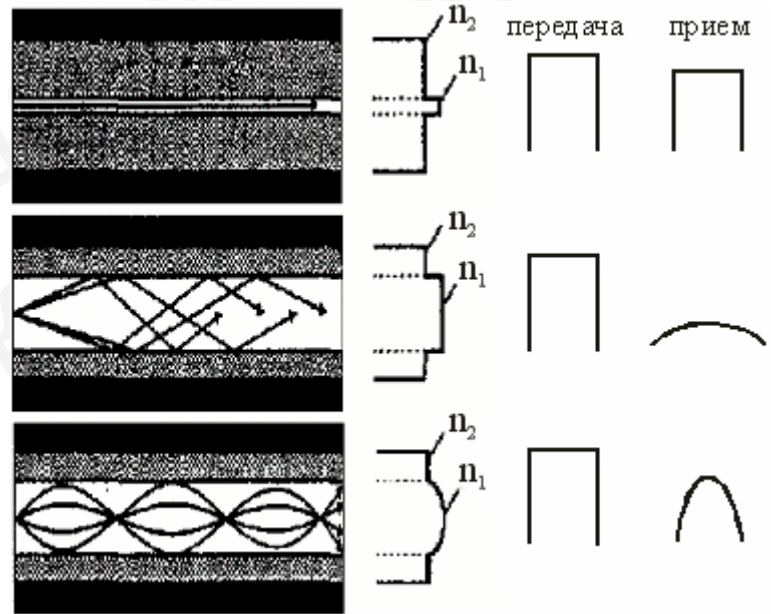
С ростом расстояния от начала регенерационного участка затухание возрастает, а полоса пропускания за счет увеличения дисперсии уменьшается.

Длина регенерационного участка выбирается по наименьшему значению $l_\alpha = \alpha_{\text{доп}}/\alpha$ или $l_{\Delta F} = (\Delta F/\Delta F_{\text{доп}})^2$, так, чтобы не превышались допустимые значения по затуханию световода ($\alpha_{\text{доп}}$) и его пропускной способности ($\Delta F_{\text{доп}}$).

В общем случае ограничивающим фактором может быть как дисперсия τ , так и затухание α .

Длина регенерационного участка лимитируется:

- в *многомодовых световодах* в первую очередь дисперсией;
- в *градиентных и одномодовых световодах* – затуханием.



В существующих системах цифровой оптической связи длина регенерационного участка при $\lambda = 0,85$ мкм составляет 10...20 км, а в системах на длинах волн 1,3 и 1,55 мкм может достигать 100...400 км.

Классификация типов оптического волокна

Согласно рекомендациям международного союза по электросвязи в области телекоммуникаций (МСЭ-Т) существует следующая классификация типов оптического волокна, определяемая соответствующими стандартами.

Стандарт G.650 дает общие определения типов волокон, перечень основных характеристик и параметров одномодовых волокон, а также методов измерения и контроля этих параметров.

Стандарт G.651 распространяется на многомодовое оптическое волокно с диаметром световедущей жилы 50 мкм и оболочки 125 мкм и на кабели на его основе. В нем содержатся рекомендации по основным параметрам этих волокон, контролируемым характеристикам и допустимым нормам. Этот тип волокна в настоящее время используется только в коротких, внутриобъектовых системах передачи с рабочей длиной волны 0,85 и редко 1,31 мкм.