

# Методы и средства измерения полосы пропускания и дисперсии оптических волокон

Наряду с **затуханием**, важнейшим параметром волоконно-оптических систем передачи является **полоса пропускания  $\Delta F$**  (пропускная способность), которую ограничивает явление дисперсии. В волоконной оптике **дисперсией** называют разницу во времени прохождения отрезка световода спектральных или модовых составляющих оптического сигнала из-за различия групповых скоростей их распространения. Дисперсия приводит к увеличению длительности световых импульсов с увеличением длины световода и, тем самым, ограничивает скорость и дальность передачи информации.

Мерой дисперсионного увеличения длительности импульса является среднеквадратичное уширение, определяемое соотношением:

$$\tau = \sqrt{t_{\text{ИВЫХ}}^2 - t_{\text{ИВХ}}^2},$$

где  $t_{\text{ИВЫХ}}$  и  $t_{\text{ИВХ}}$  — длительности импульсов на выходе и входе оптического волокна соответственно, измеренные на уровне половины амплитуды импульсов.

Наличие дисперсии ухудшает амплитудно-фазовые соотношения сигналов световых волн, снижая тем самым объем передаваемой информации за счет увеличения длительности импульсов в цифровых системах и увеличения искажений сигналов в аналоговых системах.

# Основных вида дисперсии

- межмодовую дисперсию
- хроматическую дисперсию
- поляризационную модовую дисперсию

# Межмодовая дисперсия

**Межмодовую дисперсию** ( $\tau_{\text{мм}}$ ), которая ограничивает скорость передачи данных в системах, использующих многомодовое волокно, и возникает вследствие разделения сигнала на многочисленные моды, распространяющиеся по различным траекториям в ОВ;

## Хроматическая дисперсия

**Хроматическую дисперсию** ( $\tau_{\text{хр}}$ ), которая зависит от физико-топологических параметров одномодового и многомодового волокна и возникает вследствие отличия времени распространения мод с различной длиной волны;

Поляризационную модовую дисперсию

Поляризационную модовую дисперсию ( $\tau_{\text{ПМД}}$ ),

которая становится ограничивающим фактором в одномодовых волокнах с уменьшенной хроматической дисперсией и вызвана разделением излучения на ортогональные поляризованные моды, которые распространяются по ОВ с различной скоростью.



Вклад каждой составляющей в общую дисперсию определяется соотношением:

$$\tau_{\Sigma} = \sqrt{\tau_{\text{мм}}^2 + \tau_{\text{хр}}^2 + \tau_{\text{пмд}}^2}.$$

В свою очередь, вклад **в хроматическую дисперсию** вносят **материальная и волноводная дисперсия**.

В **многомодовых световодах** вклад **межмодовой дисперсии**, как правило, является **определяющим**.

В **одномодовых световодах** из-за **отсутствия межмодовой дисперсии** определяющим механизмом уширения импульсов в большинстве случаев является **хроматическая дисперсия**.

**Поляризационная модовая дисперсия** может вносить заметный вклад вблизи точек нулевой **хроматической дисперсии** при использовании узкополосных источников светового излучения.

# Измерение межмодовой дисперсии

Известно, что в многомодовом ОВ все моды распространяются по различным траекториям, в следствии чего огибающие модулированного светового сигнала различных мод по мере распространения сигнала по волокну всё больше и больше отличаются по фазе. При использовании цифровой системы каждая мода передает информационный импульс, время распространения которого отличается от времени распространения импульса другой моды, что в результате вызывает изменение формы результирующего импульса на выходе ОВ, в частности, увеличение длительности и уменьшение амплитуды переданного импульса. Описываемое явление **называется межмодовой дисперсией**, которая обычно ограничивает расстояние передачи многомодового ОВ до 1 км и менее, обеспечивая битовую скорость до 1 Гб/с.

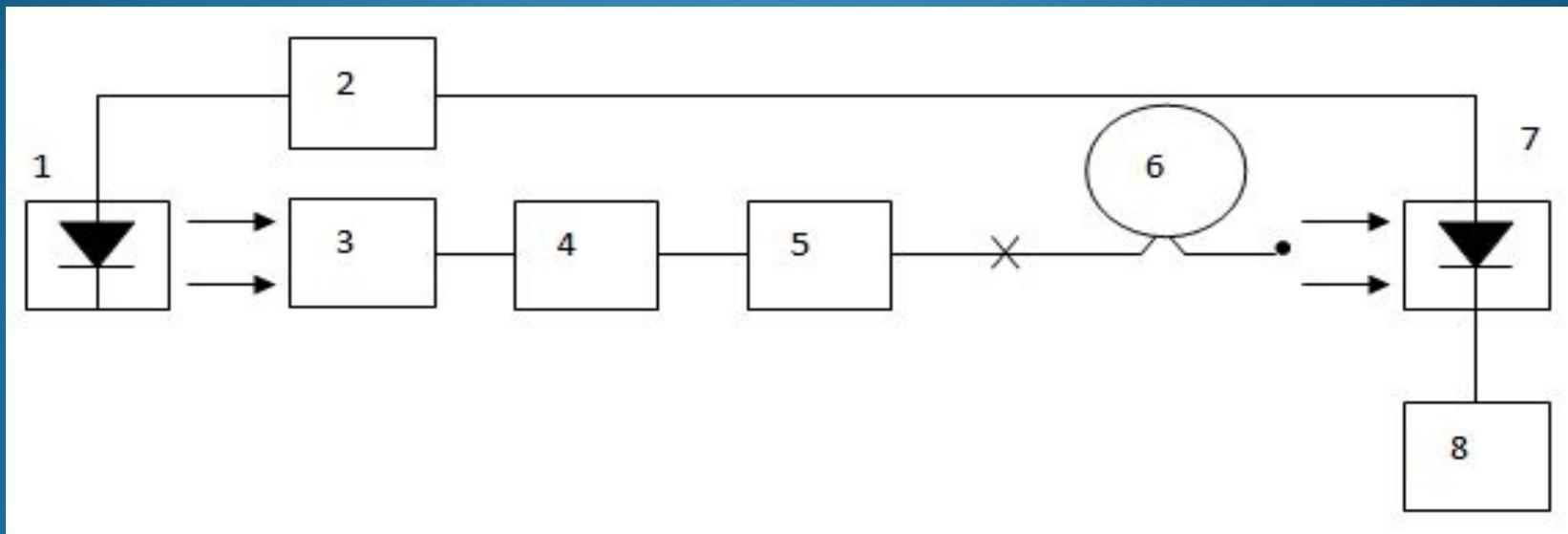
- Методы измерения межмодовой дисперсии можно классифицировать в соответствии с **временным** или **частотным** представлением по способам реализации испытательных сигналов или их регистрации. Наиболее естественной является классификация по способам реализации испытательных сигналов. Согласно этой классификации методы измерения разделяются на :

- импульсные
- частотные

# Импульсный метод

**Импульсный метод** основан на последовательной регистрации импульсов оптического излучения на выходе волокна измеряемого кабеля и на выходе его короткого отрезка, образованного за счет обрыва в начале волокна.

## Измерение передаточных характеристик импульсным методом проводят на установке:



1 – источник излучения; 2 – блок управления; 3 – устройство ввода; 4 – смеситель мод; 5 – фильтр мод оболочки; 6 – измеряемый оптический кабель; 7 – приемник излучения; 8 – регистрирующее устройство

Передаточную характеристику в частотном представлении  $\sigma(\omega)$  определяют по формуле:

$$\sigma(\omega) = \frac{P_1(\omega)}{P_2(\omega)},$$

Где  $P_1(\omega)$  и  $P_2(\omega)$  - **спектральная плотность** мощности импульса на входе и выходе волокна измеряемого кабеля.

Модуль комплексной функции  $\sigma(\omega)$  есть **амплитудно-частотная модуляционная** характеристика измеряемого кабеля.

Значение **спектральной плотности мощности** входного (выходного) импульсов определяют по формуле:

$$P_{1,2}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} U_{1,2}(t) \exp(-j\omega t) dt,$$

где  $U_{1,2}(t)$  - зарегистрированный импульс на входе (выходе) волокна измеряемого кабеля.

Значение **ширины полосы пропускания** оптического кабеля принимают равной частоте, на которой амплитуда сигнала амплитудно-частотной модуляционной характеристики изменилась (уменьшилась) на 3 дБ.

Коэффициент широкополосности (**K**) оптического волокна измеряемого кабеля определяют по формуле:

$$K = B \cdot L^m,$$

где **B** - ширина полосы пропускания измеряемого оптического кабеля, МГц;

**L** - длина измеряемого кабеля, км;

**m** - эмпирический параметр, установленный в стандартах или технических условиях на конкретный оптический кабель.

В случае наличия на входе и выходе измеряемого кабеля импульсов, имеющих форму кривой Гаусса, полосу пропускания определяют на основании имеющей место дисперсии по формуле:

$$B = \frac{440}{\sqrt{t_{\text{ВЫХ}}^2 - t_{\text{ВХ}}^2}},$$

где  $B$  - полоса пропускания, МГц;

$\sqrt{t_{\text{ВЫХ}}^2 - t_{\text{ВХ}}^2}$  - дисперсия импульса, нс;

$t_{\text{ВЫХ}}$  и  $t_{\text{ВХ}}$  - длительность выходного и входного импульса по уровню 0,5, нс.

Для гауссова **входного импульса шириной  $t_{и\text{ вх}}$**  и **выходного импульса  $t_{и\text{ вых}}$**  из приведенных выше соотношений следует:

$$t_{и\text{ вых}}^2 = t_{и\text{ вх}}^2 + \tau_{\Sigma}^2,$$

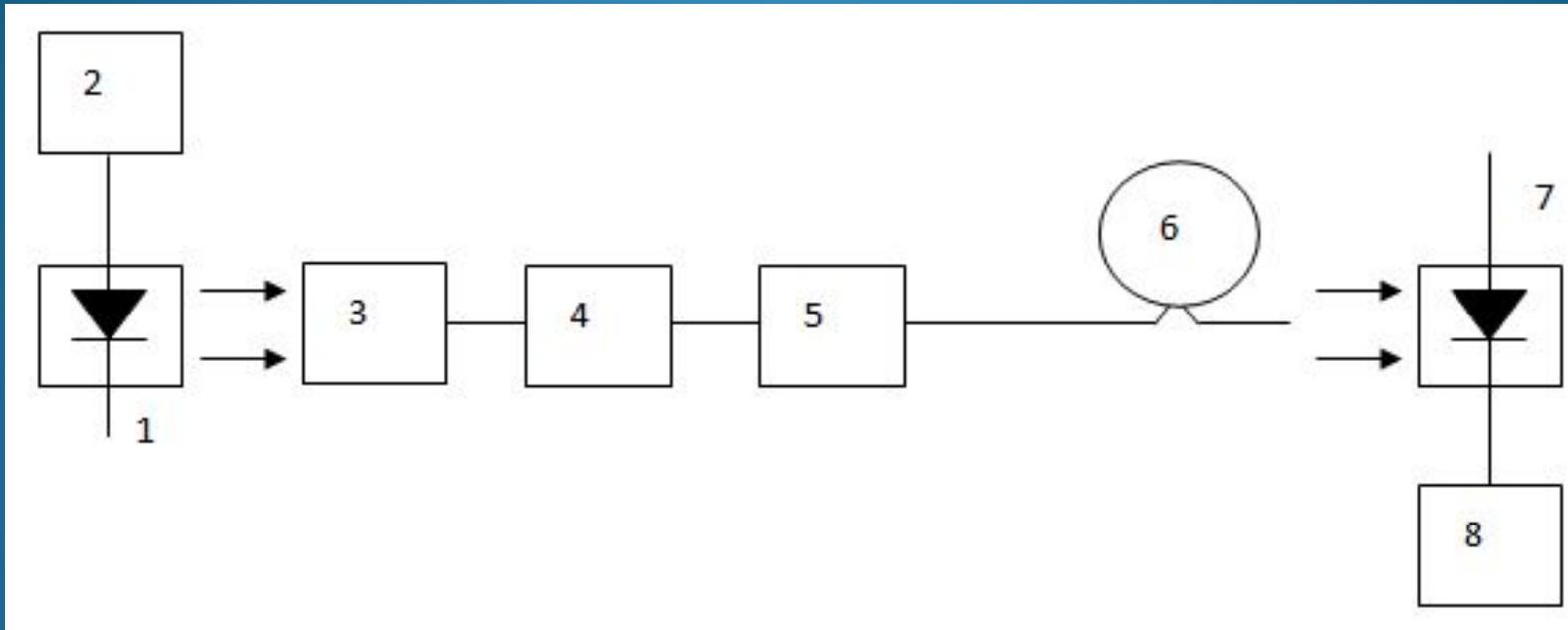
где  $\tau_{\Sigma}$  отождествляется с шириной импульсной характеристики, которая определяется через **инверсное преобразование Фурье**:

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \sigma(\omega) \exp(+j\omega t) dt$$

# *Частотный метод*

**Частотный метод** основан на сравнении зависимостей изменения сигнала на выходе волокна измеряемого кабеля и на выходе короткого его отрезка от частоты модуляции оптического сигнала.

## Измерение передаточных характеристик частотным методом проводят на установке:



- 1 - источник излучения, 2 - задающий генератор, 3 - устройство ввода;  
4 - смеситель мод; 5 - фильтр мод оболочки; 6 - измеряемый кабель;  
7 - приемник излучения; 8 - регистрирующая система

Строят график отношения значений сигналов переменной составляющей на выходе короткого отрезка и всего кабеля от частоты модуляции, то есть **амплитудно-частотную характеристику** измеряемого оптического кабеля. Значение ширины полосы пропускания оптического кабеля принимают равной частоте, на которой амплитуда сигнала амплитудно-частотной характеристики уменьшилась на 3 дБ. **Коэффициент широкополосности определяют по формуле:**

$$K = B \cdot L^m,$$

где **B** - ширина полосы пропускания измеряемого оптического кабеля, МГц;

**L** - длина измеряемого кабеля, км;

**m** - эмпирический параметр, установленный в стандартах или технических условиях на конкретный оптический кабель.

# Измерение хроматической дисперсии

В настоящее время одномодовое волокно занимает господствующее положение в технике волоконно-оптической связи. Это связано с тем, что в отличие от многомодового волокна, в одномодовом волокне поддерживается поперечная пространственная когерентность света и отсутствует межмодовая дисперсия. **Хроматическая дисперсия** ограничивает скорость и дальность передачи информации по одномодовому волокну с использованием одного спектрального канала.

**Хроматическая дисперсия** это уширение длительности светового импульса при распространении по волокну, связанное с различием групповых скоростей распространения спектральных составляющих импульса. Источником света в высокоскоростных ВОСП обычно являются полупроводниковые лазеры с достаточно узкой, но конечной шириной спектра излучения.

В одномодовом волокне **хроматическая дисперсия** возникает вследствие взаимодействия двух явлений

- **материальной дисперсии**
- **волноводной дисперсии**

**Материальная дисперсия** возникает из-за нелинейной зависимости показателя преломления кварца от длины волны и соответствующей групповой скорости, в то время как причина **волноводной дисперсии** является зависимость от длины волны отношения к групповой скорости к диаметру сердцевины и отличие показателя преломления сердцевины и оболочки. Третья составляющая дисперсии, так называемая **поляризационная модовая дисперсия (PMD) второго порядка**, или дисперсия дифференциальной групповой задержки, определяется поляризационными характеристиками волокна и оказывает влияние, сходное с влиянием хроматической дисперсии. PMD второго порядка устанавливает крайний предел, до которого может быть компенсирована хроматическая дисперсия

Разброс групповых скоростей, т.е. величина уширения за счет хроматической дисперсии  $\tau_{\text{хр}}$  в линейном приближении прямо пропорционально длине волокна  $L$  и ширине спектра  $\Delta\lambda$  светового импульса:

$$\tau_{\text{хр}} = D_{\lambda} \cdot L \cdot \Delta\lambda,$$

где  $D_{\lambda}$  – коэффициент хроматической дисперсии. Это малое изменение задержки светового импульса на участке волокна единичной длины (1 км) при единичном изменении длины волны (1 нм) несущей этого импульса. Единица измерения – пс/(нм·км). Его величина определяется как производная от спектральной зависимости групповой задержки  $\tau(\lambda)$ :

$$D_{\lambda} = \frac{\partial\tau(\lambda)}{\partial\lambda} \cdot \frac{1}{L}.$$

Скорость передачи информации волоконно-оптической системы по одному каналу связи максимальна в случае, если групповая задержка не зависит от длины волны, т.е.  $D_\lambda=0$ . Длина волны  $\lambda_0$ , соответствующая этому условию, называется **длиной волны нулевой дисперсии**. При этой длине волны коэффициент хроматической дисперсии принимает нулевое значение. Единица измерения - нм.

Вблизи точки нулевой дисперсии зависимость коэффициента хроматической дисперсии от длины волны можно **аппроксимировать линейной зависимостью**:

$$D_\lambda = S_0(\lambda - \lambda_0),$$

где  $S_0$  – наклон спектральной зависимости коэффициента хроматической дисперсии на длине волны нулевой дисперсии, измеряемый в пс/(нм<sup>2</sup>·км).

В соответствии с рекомендациями ITU-T G.650 существует три регламентируемых метода измерения дисперсии:

- фазовый метод измерения
- интерферометрический метод
- импульсный метод измерения

# Фазовый метод измерения

Сущность **фазового метода** состоит в сравнении фазы прошедшего через измеряемый световод сигнала с фазой опорного сигнала. Полученные значения сдвига фаз  $\varphi(\gamma)$  связаны с групповыми задержками формулой:

$$\tau(\lambda) = \varphi / (2\pi f),$$

где  $f$  – частота модуляции сигнала. Измерения задержки должны быть проведены на нескольких длинах волн. Реализовать измерения можно несколькими способами:

- использовать несколько источников излучения с фиксированными длинами волн и широкополосный фотоприемник;
- использовать источник с перестраиваемой длиной волны (перестраиваемый лазер или широкополосный источник с селектором длин волн) и широкополосный фотоприемник;
- использовать широкополосный источник и фотоприемник с селектором длин волн.

В случае использования измерителя хроматической дисперсии с перестраиваемой рабочей длиной волны необходимо установить границы спектрального диапазона и шаг изменения длины волны. Структурная схема фазового метода измерения хроматической дисперсии с использованием широкополосного источника излучения и фотоприемника с селектором длин волн представлена на рисунке:



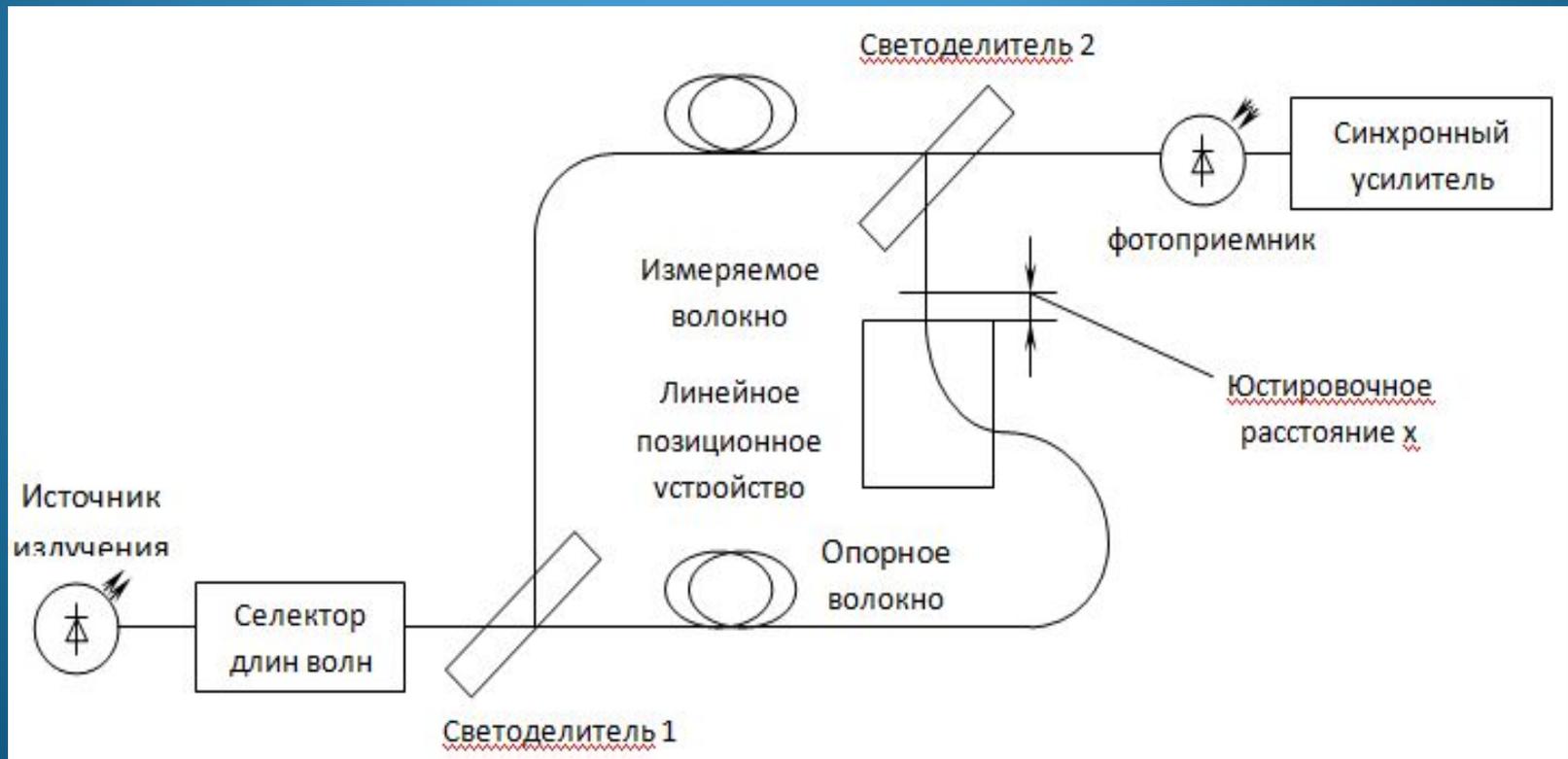
Развитием фазового метода является дифференциальный фазовый метод, когда измеряются относительные фазовые сдвиги и относительные задержки  $\tau_1$  и  $\tau_2$  двух сигналов на соседних близкорасположенных длинах волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ .

Значение величины дисперсии на длине волны  $\lambda_{1/2}$ , равной полусумме длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , определяется линейной аппроксимацией по формуле:

$$D(\lambda_{1/2}) = \frac{1}{L} \cdot \frac{(\tau_1 - \tau_2)}{(\lambda_1 - \lambda_2)}.$$

# Интерференционный метод

Интерференционный метод является альтернативным и реализуется по структурной схеме, использующей интерферометр Маха–Цандера и представленный на рисунке:



Излучение от широкополосного источника после селектора длин волн попадает в интерферометр Маха–Цандера. При линейном перемещении конца волокна, входящего в состав **опорного плеча интерферометра**, в опорный канал вносится известная разность оптических длин, значение которой позволяет **вычислить групповую задержку светового сигнала в тестируемом волокне**, расположенном в измерительном плече интерферометра.

**Интерферометрический метод** применяется при измерении характеристик коротких отрезков волокна длиной несколько метров и в основном используется для контроля производственного процесса при изготовлении волокон и компонентов систем передачи.

# Импульсный метод

**Импульсный метод измерения хроматической дисперсии.** Стандарт ITUT G.650 регламентирует также метод, основанный на прямом измерении задержки световых импульсов с различными длинами волн при прохождении через волокно заданной длины (time offlight). В этом методе можно проводить измерения времени задержки оптических импульсов лазеров при прохождении заданного участка волокна «туда и обратно», т.е. при отражении от удаленного конца волокна. Точность измерения хроматической дисперсии (CD) в этом методе ниже, чем точность измерения фазовым методом из-за меньшей точности измерения временных задержек. **Схема установки для проведения измерений при этом остается почти такой же, как и при измерении фазовым методом.** Вместо фазометра при измерении импульсным методом необходимо использовать другое устройство, позволяющее измерять относительную временную задержку двух импульсов.

Поскольку точность импульсного метода обратно пропорциональна длительности используемых импульсов, то необходимо, чтобы их длительность была не более 400 пс.

# Измерение поляризационной модовой дисперсии

Свет – это поперечные электромагнитные волны.

Направление колебаний векторов электрического поля в идеально круглом волокне может быть любым в плоскости, перпендикулярной оптической оси. Поэтому фундаментальная мода в одномодовом волокне содержит две ортогональные поляризованные компоненты, то есть включает в себя две ортогонально поляризованные моды. В волокне с оптически идеальной симметричной круглой сердцевиной и оболочкой как в объемной изотропной среде моды обеих поляризаций распространялись бы с одинаковой скоростью. Небольшие отклонения сердцевины волокна или оболочки от идеальной вращательной симметрии, а также возникновение механических напряжений ведут к появлению двулучепреломления.

Такие нарушения идеально круговой симметрии всегда присутствуют в реальных волокнах, поэтому в них ортогонально поляризованные компоненты световых импульсов (поляризационные моды) распространяются с несколько различными скоростями. Если входной импульс возбуждает обе составляющие поляризации, то у выхода из волокна он уширяется из-за того, что ортогонально поляризованные компоненты оказываются сдвинуты друг относительно друга. Разделение мод, а точнее их задержка друг относительно друга, на выходе из волоконного световода называется **поляризационной модовой дисперсией (PMD)**. PMD играет важную роль в высокоскоростных ВОСП, особенно при использовании усилителей для увеличения дальности передачи информации и компенсаторов для уменьшения влияния хроматической дисперсии.

Величину уширения импульсов можно оценить, используя время задержки между двумя составляющими поляризации импульса. При длине волокна значение определяется соотношением:

$$\Delta T_{xy} = \left| \frac{L}{V_{gx}} - \frac{L}{V_{gy}} \right|,$$

где  $V_{gx}$  и  $V_{gy}$  - групповые скорости распространения ортогонально поляризованных мод.

Величина  $\Delta T/L$  является **единицей измерения РМД** (аналогично межмодовой дисперсии в коротком многомодовом волокне). Для оценки значения РМД в обычных телекоммуникационных волокнах эту формулу использовать непосредственно нельзя.

В силу случайного характера анизотропии в волокне, используемом в системах связи, в них нет выделенных состояний поляризации. Фактически **PMD** характеризуется **среднеквадратичным значением**, получаемым **после усреднения случайных возмущений вдоль всего волокна**. В результате такого усреднения для величины среднеквадратичного уширения световых импульсов в ОВ была получена формула:

$$\Delta\tau \approx D_{\text{PMD}} \sqrt{L},$$

где  $D_{\text{PMD}}$  - это параметр PMD с типичными значениями, находящимися в диапазоне  $= (0,1 \div 1) \text{ пс}/\sqrt{\text{км}}$ .

Существуют два метода, на которых основано определение параметра PMD:

- временной метод
- волновой (частотный) метод

## Временной метод

**Временной метод** основан на поиске экстремальных точек посредством измерений поляризации и определяет исходя из анализа эволюции выходного состояния поляризации по мере изменения длины волны, анализа собственных матриц Джонса на интервалах длин волн, по скорости вращения выходного состояния поляризации вокруг оси основных состояний на сфере Пуанкаре.

# Волновой (частотный) метод

**Волновой метод** основан на преобразовании Фурье при интерферометрических измерениях и определяет временную задержку исходя из интерферограммы, получаемой путем помещения измеряемого устройства в интерферометр с низкой когерентностью.

# Волновые методы измерения РМД

Они включают методы измерения РМД путем **сканирования длины волны и матрицы Джонса**, которые относятся к волновым методам, так как позволяют извлечь информацию из изменения состояния поляризации на выходе тестируемого устройства по мере изменения длины входной световой волны.

# Метод сканирования длины волны

**В методе сканирования длины волны** среднее значение дифференциальной групповой задержки определяется статистически, исходя из количества максимальных и минимальных значений мощности на выходе анализатора по мере сканирования

Хотя отклонение выходной поляризации в случае использования волокна с произвольно связанными модами является неустойчивым на любой длине волны, существует **два основных состояния поляризации**, при небольших отклонениях от которых выходная поляризация будет изменяться в достаточно малом интервале длины волны. На этом основано несколько альтернативных конфигураций метода сканирования длины волны длины волны, приведенных на рисунках.



Схема измерения PMD анализатором оптического спектра



Схема измерения PMD измерителем мощности

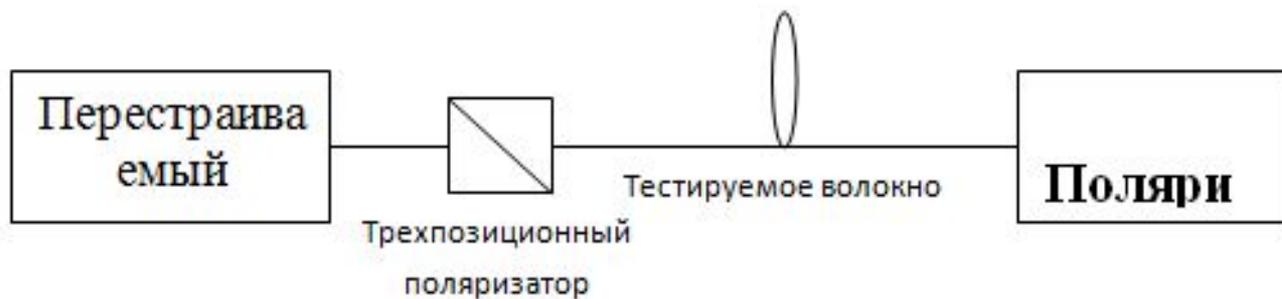


Схема измерения PMD поляриметром

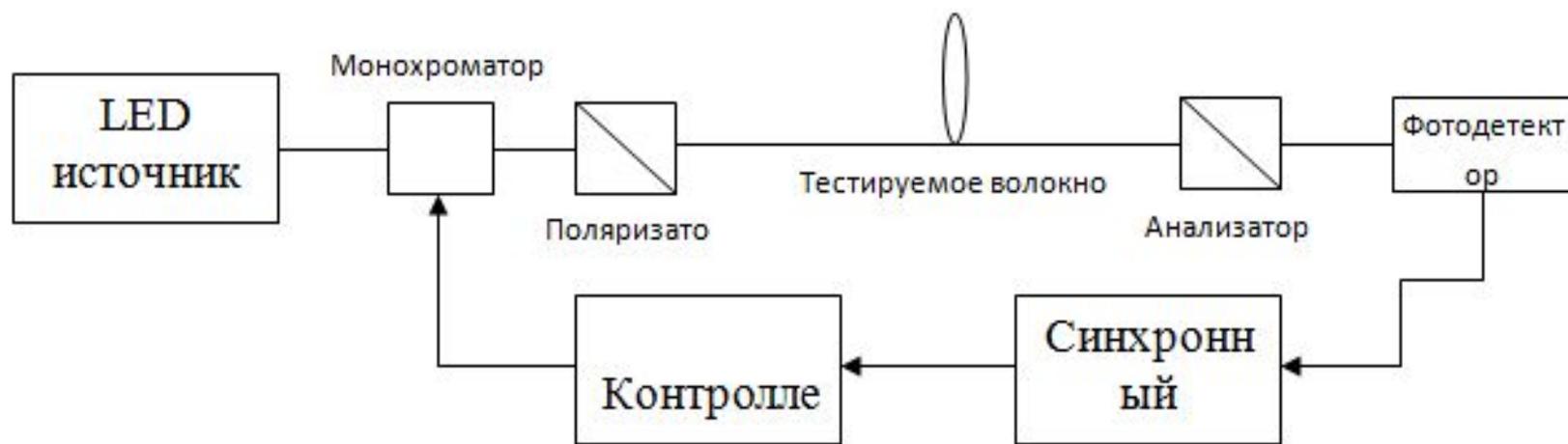


Схема измерения PMD монохроматором

Эти схемы отличаются **типом источника излучения**, а так же **используемыми средствами определения ширины спектра и настройки длины волны**. Для обеспечения адекватного определения характеристик спектральное разрешение схемы должно удовлетворять требованию:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} < \frac{1}{8\nu\Delta\tau},$$

где  $\Delta\lambda$  - спектральная ширина источника или разрешение полосы пропускания приемника, м;  $\lambda$  - номинальная длина волны измерения, м;  $\nu$  - оптическая частота, Гц;  $\Delta\tau$  - дифференциальная групповая задержка тестируемого устройства, с.

# Анализ методом подсчета экстремальных значений при сканировании длины волны

При подсчете экстремальных значений имеющих место при сканировании длины волны в диапазоне от до , среднее значение дифференциальной групповой задержки тестируемого устройства может быть определено в соответствии с выражением:

$$\langle \Delta\tau \rangle_\lambda = \frac{kN_e\lambda_1\lambda_2}{2(\lambda_2 - \lambda_1)c},$$

где  $N_e$  - количество экстремальных значений (максимальных и минимальных);  $c$  - скорость света;  $k$  - безразмерный коэффициент, который называется коэффициентом взаимодействия мод и равен 0.824 для волокна с произвольной связью мод и 1.0 для вырожденного волокна. Подстрочный индекс  $\lambda$  в  $(\Delta\tau)$  указывает, что дифференциальная групповая задержка определена для интервала длины волны.

# Анализ методом преобразования Фурье

Анализ выходного сигнала стационарного анализатора может быть смещен во временную область с использованием преобразования Фурье. В случае использования волокна с произвольной связью мод результирующий спектр функционально эквивалентен результату интерферометрического измерения, рассматриваемого далее, и имеет Гауссово распределение. Поэтому значение PMD определяется путем подгонки кривой Гаусса в соответствии с данными или путем вторичного подсчета аналогично интерферометрическому методу. Оценка выходного сигнала стационарного анализатора при помощи анализа Фурье имеет преимущество, заключающееся в том, что она графически отражает характеристики связи мод образца. Кроме этого, анализ Фурье позволяет осуществлять фильтрацию высоких частот, вызванных шумами или вибрацией, которые могут быть обнаружены как максимальные и минимальные значения при использовании метода подсчета экстремумов.

# Анализ методом параметров Стокса

В рассмотренном выше методе изменение выходного состояния поляризации от длины волны оптического излучения определяется исходя из его передачи через анализатор. Обнаружение выходной поляризации при помощи быстрого поляриметра дает некоторые преимущества по сравнению с использованием анализатора. Это связано тем, **что значения нормализованных параметров Стокса дают полное описание выходной поляризации на данной длине волны, причем каждый параметр может анализироваться путем подсчета экстремумов или анализа Фурье, а получаемые в результате три значения дифференциальной групповой задержки усредняются.** В связи с этим, по сравнению с рассмотренным выше измерением с помощью анализатора, измерения с использованием поляриметра менее зависимы от поляризации входного излучения и положения пигтейлов.

Второе преимущество применения поляриметра заключается в том, что нормализованные параметры Стокса не зависят от изменений оптической мощности, в связи с чем отпадает необходимость в проведении эталонного измерения, а уровень абсолютной мощности может варьироваться во время измерения, не влияя на его точность. Поляриметр также позволяет наблюдать выходное состояние поляризации на сфере Пуанкаре с целью анализа стабильности тестового устройства. Это с одной стороны наглядно демонстрирует состояния поляризации и дисперсию, а с другой стороны исключает присущую анализатору чувствительность к механическому перемещению и изменениям температуры.

Однако при использовании поляриметра необходимо учитывать, что:

- измерение больших значений PMD требует более разнесенных длин волны и более высокого разрешения источника;
- увеличением разрешения длины волны связано с уменьшением динамического диапазона;
- диапазон длин волн должен быть достаточно широким для получения хороших статистических данных;
- когерентность источника должна быть больше измеряемого запаздывания, чтобы избежать деполяризации;
- измерение занимает очень много времени и чувствительно к вибрации волокна и температуре;
- необходима связь между входом и выходом волокна, что недопустимо в полевых условиях.

# Анализ методом матриц Джонса

В отличие от рассмотренных выше методов анализа применение матриц Джонса (МЖ) позволяет напрямую определить разницу групповых задержек мод с основными состояниями поляризации в зависимости от длины волны. Анализ основывается на измерении собственных матриц устройств с линейной функцией передачи на серии длин волн. Метод может быть использован для коротких и длинных волокон вне зависимости от степени связи мод. Ограничение линейности исключает возможность использования оптических устройств, генерирующих новые оптические частоты. При этом ограничение временной инвариантности относится только к преобразованию поляризации, вызванному устройством, и не включает абсолютную задержку оптической фазы.

Согласно методу Джонса входной и выходной поляризованные сигналы выражаются как **одноименный вектор**, который состоит из двух элементов матрицы, полностью описывающей амплитуду и состояние поляризации сигнала. Последняя определяется из отношения измеренных выходных состояний к известным входным состояниям и описывает характеристики преобразования поляризации двухпортового устройства, включая абсолютную задержку распространения света, которая не учитывается при определении дифференциальной групповой задержки.

Дифференциальная групповая задержка определяется на основе двух матриц Джонса, полученных при двух незначительно отличающихся длинах волн и определяется как:

$$\Delta\tau = |\tau_1 - \tau_2| = \left| \frac{\text{Arg}(\rho_1 / \rho_2)}{\Delta\nu} \right|,$$

где  $\tau_1$  и  $\tau_2$  - групповые задержки сигналов с основными состояниями поляризации;  $\Delta\nu$  - изменение оптической частоты, соответствующее интервалу длины волны, рад/с;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  - собственные значения измеренных матриц Джонса.

# Основные ограничения метода сканирования

длины волны, к которым, в частности, относятся:

- минимальные значения PMD ограничены спектральным разрешением, так как меньшие значения PMD требуют более высокого разрешения;
- погрешность измерения PMD пропорциональна спектральному диапазону ввиду того, что более широкий диапазон спектра требует более высокой точности и разрешения;
- определение экстремальных значений зависит от шума и других внешних воздействий;
- когерентность источника должна быть больше, чем запаздывание PMD, которое необходимо измерить, чтобы избежать деполяризации источника;
- время измерения достаточно велико и, следовательно, зависит от изменений состояния волокна во время измерения (например, к вибрации);
- необходима связь между входом и выходом волокна, что неосуществимо в полевых условиях;
- чувствительность к поляризации входного излучения.

# Временные методы измерения РМД

Как было отмечено выше, в настоящее время известен ряд методов измерений РМД во временной области, к которым относятся **интерферометрический метод** и **методы измерения по смещению фазы и задержке импульса**. В последних определяется исходя из измерения фазы огибающей модулированного по интенсивности сигнала и интервала времени между импульсами двух основных состояний поляризации, соответственно.

# Интерферометрический метод

Интерферометрический метод измерения PMD основан на измерении автокорреляции электрического поля световой волны или взаимной когерентности двух сигналов, излучаемых одним широкополосным источником. Как и методы задержки импульса и дифференциального смещения фазы, он основан на прямом измерении временной задержки. На рисунке показана **обобщенная схема измерения PMD на основе интерферометра Майкельсона с установленным на выходе источника оптического излучения поляризатором и анализатором - на входе фотодетектора.**

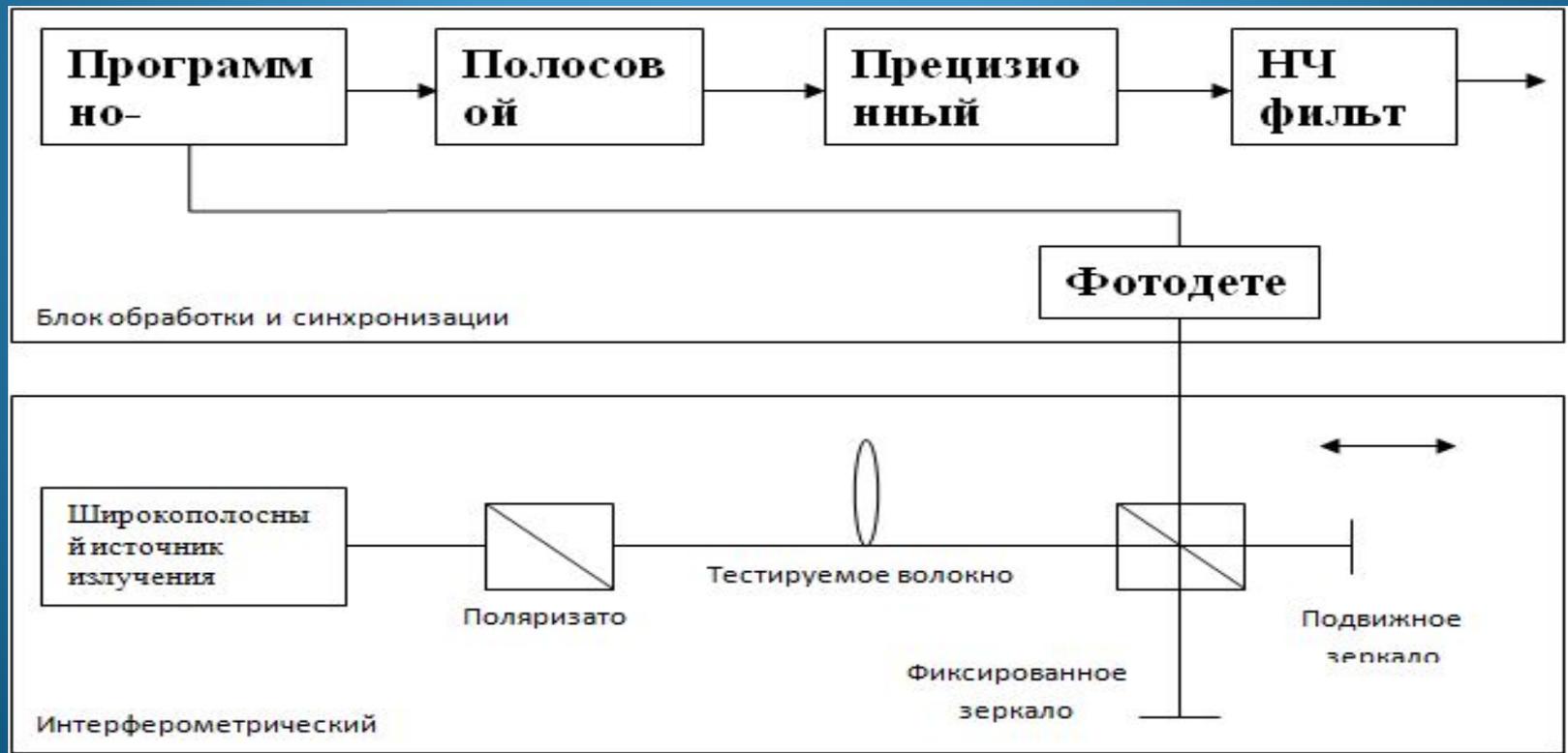


Свет от широкополосного LED или источника белого света направляется в оба канала интерферометра, а свет от перемещающегося и фиксированного зеркал накладывается в плоскости детектора. Взаимное влияние возникает, когда длина двух ответвлений различается на величину, меньшую когерентной длины источника, а максимальная видимость имеет место, когда длины каналов идентичны. При этом ширина отклика обратно пропорциональна ширине спектра источника, а амплитуда огибающей фототока является функцией временной задержки, создаваемой движущимся зеркалом, и определяемой выражением:

$$\Delta\tau = \frac{2\Delta x}{c},$$

где  $\Delta x$  - расстояние от зеркала до той точки, в которой оба канала имеют равную длину.

Интерферометрический метод применим к оптическим компонентам, как с вырожденными модами, так и к оптическому волокну со связанными модами, где основные состояния поляризации являются функциями длины волны, причем, получаемые в результате измерения интерферограммы имеют существенные различия. На рисунке приведена схема одного из наиболее распространенных измерителей поляризационной модовой дисперсии PMD-440 компании GN Nettest Fiber Optic Division.



Отличительной особенностью интерферометрического метода является возможность перемещения тестируемого волокна во время измерения, так как движение изменяет только детали интерферограммы, но не всю ее форму. Вследствие того, что интерферометрический метод позволяет быстро измерять большие значения PMD и схема легко разделяется на источник и приемник, этот метод используется для измерения инсталлированного волокна. Кроме этого, благодаря введению модуляции, он позволяет проводить измерение и линий с EDFA.

Таким образом, интерферометрический метод характеризуется следующими особенностями:

- измерение больших значений PMD требует пропорционального смещения подвижного зеркала;
- при измерениях когерентность источника должна быть меньше, чем измеряемая задержка и, следовательно, ширина спектра источника должна быть большой;
- измерение осуществляется быстро и независимо от вибрации волокна;
- из-за отсутствия связи между входом и выходом волокна, этот метод идеален для полевых условий;
- измерение осуществляется в широком динамическом диапазоне;
- показания зависят от состояния поляризации на входе объекта измерения.