

Практическая работа № 5

РАСЧЕТ ДИСПЕРСИИ ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Цель работы: рассчитать дисперсию оптического сигнала и определить необходимые мероприятия по ее компенсации.

Краткие сведения из теории

Дисперсия – это явление уширения импульсов при передаче по оптическому волокну. Она имеет размерность времени и определяется как квадратичная разность длительностей импульсов на выходе и входе кабеля протяженностью L , км:

$$\tau(L) = \sqrt{\tau_{\text{вых}}^2 - \tau_{\text{вх}}^2}. \quad (1)$$

Обычно дисперсия нормируется в расчете на 1 км и измеряется в пс/(нм·км). В одномодовом волокне на распространение сигнала оказывают влияние как хроматическая, так и поляризационно-модовая дисперсия. Хроматическая дисперсия, в свою очередь, имеет две составляющие: материальную и волноводную. Материальная дисперсия обусловлена зависимостью показателя преломления волокна от длины волны. Волноводная – обусловлена зависимостью коэффициента распространения моды от длины волны. Зависимость материальной и волноводной дисперсий от длины волны для стандартного одномодового волокна представлена на рисунке 1.

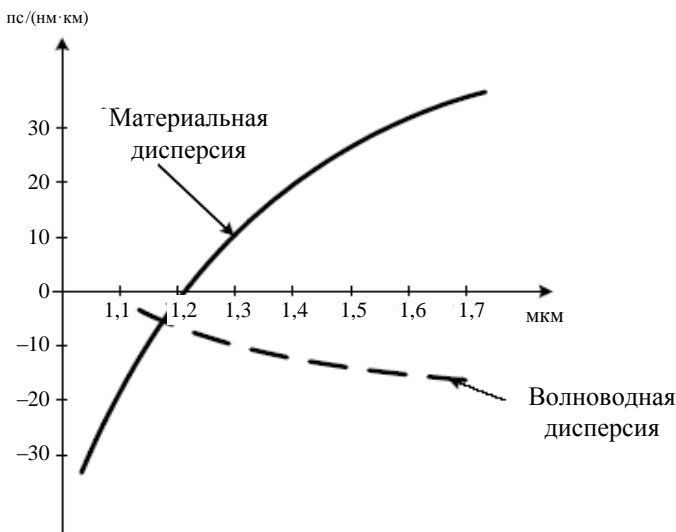


Рисунок 1 – Зависимость материальной и волноводной дисперсий от длины волны для стандартного одномодового волокна

Удельная хроматическая дисперсия вычисляется по формуле

$$\sigma = \frac{S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right], \quad (2)$$

где S_0 – наклон дисперсионной кривой одномодового волокна на длине волны нулевой дисперсии, пс/(нм²·км);

λ – рабочая длина волны, нм;

λ_0 – длина волны нулевой дисперсии, нм.

Значения удельной хроматической дисперсии, длины волны нулевой дисперсии и наклона дисперсионной кривой на длине волны нулевой дисперсии определяются положениям стандартов ИТУ-Т G.652–655 (таблица 1).

Все оптические волокна делятся на две основные группы: многомодовые (Multi Mode Fiber – MMF) и одномодовые (Single Mode Fiber – SMF).

Многомодовые волокна. Если диаметр сердечника много больше длины волны оптической несущей, то импульс света, распространяющийся в нем, состоит из многих составляющих, распространяемых в отдельных модах оптического волокна. Каждая мода возбуждается на входе световода под своим определенным углом ввода и направляется по сердечнику по своей траектории. Такой тип оптического волокна называется многомодовым. Моды проходят разные расстояния оптического пути и поэтому приходят на

выход оптического волокна в разное время, что вызывает уширение оптических импульсов, называемое межмодовой дисперсией.

Таблица 1 – Дисперсионные характеристики оптических волокон

Характеристики одномодовых оптических волокон	Стандартное SM	Со смещенной дисперсией DSF	С минимизацией затухания CSF	С ненулевой смещенной дисперсией NZDSF
	ITU-T G.652	ITU-T G.653	ITU-T G.654	ITU-T G.655
Удельная хроматическая дисперсия, пс/(нм·км), при длине волны: 1285–1330 нм 1550 нм 1530–1565 нм 1525–1575 нм	$\leq 3,5$ ≤ 18 – –	– – – $\leq 3,5$	– ≤ 20 – –	– – 1,0–6,0 –
Диапазон длин волн при нулевом значении дисперсии, нм	1300–1325	1525–1575	1260–1300	–
Максимальный наклон дисперсионной кривой в точке её нулевого значения, пс/(нм ² ·км)	$\leq 0,092$	$\leq 0,085$	$\leq 0,095$	–

Одномодовые волокна. Искажений, которые характерны для многомодовых оптических волокон, можно избежать, если подобрать их структурные параметры таким образом, чтобы в волокне распространялась одна единственная – основная мода. Такие волокна называются одномодовыми.

Межмодовая дисперсия в одномодовом оптическом волокне отсутствует. Однако основная мода также уширяется во времени по мере прохождения по такому световоду.

Для кварцевых оптических волокон минимум затухания соответствует длине волны 1550 нм, но при скоростях передачи порядка нескольких Гбит/с дальность связи на этой длине волны может ограничиваться хроматической дисперсией, поэтому для ее снижения осуществляется выбор соответствующего профиля показателя преломления.

Одномодовые волокна со смещенной дисперсией. Стандартное одномодовое оптическое волокно не обеспечивает малой дисперсии для длины волны 1550 нм, поэтому были разработаны оптические волокна со смещенной дисперсией (Dispersion-Shifted Fiber – DSF), которые отличаются конфигурацией профиля показателя преломления.

Основой для создания оптических волокон со смещенной дисперсией является ее отрицательная волноводная дисперсия. Делая волноводную дисперсию большой и отрицательной, можно скомпенсировать материальную дисперсию и сдвинуть нулевую дисперсию в длинноволновую область (рисунок 2). Сдвиг достигается уменьшением диаметра сердечника ОВ, увеличением оптической разности показателя преломления и конфигурацией профиля показателя преломления.

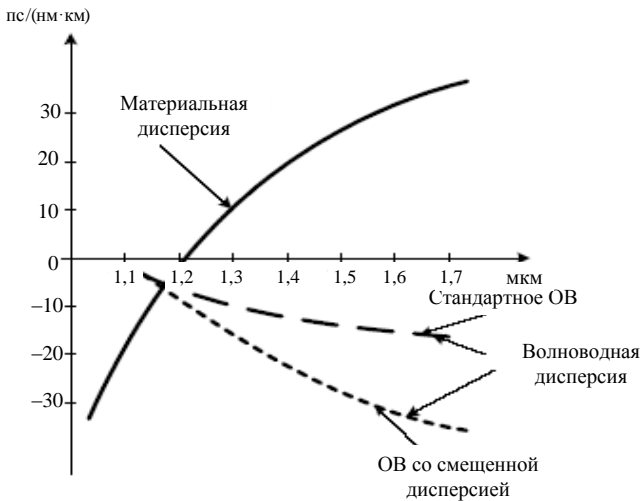


Рисунок 2 – Отличие волноводной дисперсии в стандартном оптическом волокне и в оптическом волокне со смещенной дисперсией

Зависимость дисперсии от длины волны оптического излучения различных одномодовых оптических волокон показана на графике (рисунок 3).

Из графика видно, что хроматическая дисперсия у стандартного ОВ на длине волны 1550 нм составляет около 18 пс/(нм·км). Оптические потери у одномодовых волокон на длине волны 1550 нм приблизительно в два раза меньше, чем потери на длине волны 1310 нм. Сдвиг длины волны нулевой дисперсии на длину волны 1550 нм позволяет извлечь выгоду из этих малых оптических потерь и получить при этом меньшие искажения импульсов.

Одномодовые волокна с минимизацией затухания. Одномодовые волокна с минимизацией затухания (Conventional Single-mode Fiber – CSF) имеют нулевую дисперсию при длине волны около 1300 нм с минимальным уровнем потерь. При длине волны около 1550 нм данное одномодовое оптическое волокно имеет смещенную дисперсию и отсечку. Оно оптимизировано для использования в диапазоне длин волн 1530–1625 нм. Одномодовое волокно с минимизацией затухания, имеющее очень малые потери, мо-

жет использоваться в приложениях для цифровой передачи на большие расстояния, таких как наземные системы дальней связи и магистральные подводные кабели с оптическими усилителями.

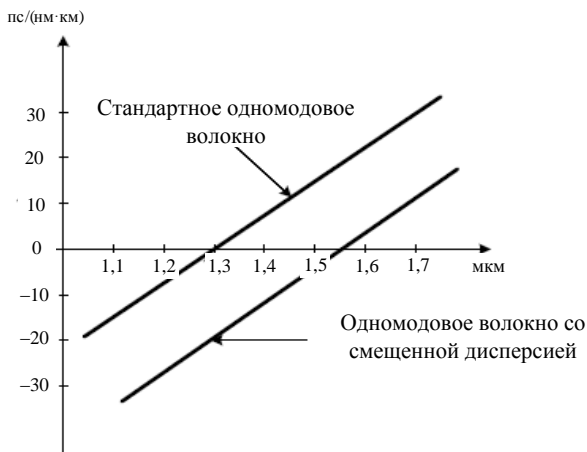


Рисунок 3 – Зависимость дисперсии от длины волны оптического излучения различных одномодовых оптических волокон

Одномодовые волокна с ненулевой смещенной дисперсией. В системах с мультиплексированием каналов по длинам волн (DWDM) и с оптическим усилением компенсация дисперсии представляет более сложную задачу, так как мощность оптических усилителей достаточна для того, чтобы создавать нелинейные эффекты в одномодовом оптическом волокне. Использование одномодовых оптических волокон со смещенной дисперсией решает проблемы, связанные с хроматической дисперсией на длине волны 1550 нм, однако оно не подходит для использования в DWDM-системах из-за ряда нелинейных явлений. Поэтому второй целью компенсации хроматической дисперсии является ограничение искажений, вызываемых этими нелинейными явлениями. Снижение влияния нелинейных эффектов может быть достигнуто наличием в оптическом волокне небольшого (ненулевого) уровня хроматической дисперсии. Поэтому было разработано одномодовое волокно с ненулевой смещенной дисперсией (Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber, NZDSF).

Волокна NZDSF дают возможность работать в значительно более широком диапазоне длин волн благодаря тому, что в результате ряда усовершенствований кривая зависимости дисперсии от длины волны у этих волокон более гладкая и пологая. Гладкость и пологость этой кривой улучшают характеристики волокна из-за того, что исключается необходимость решения сложной проблемы компенсации дисперсии.

Хроматическая дисперсия волокна рассчитывается по формуле

$$\tau_{\text{хр}} = \sigma \Delta \lambda L, \quad (3)$$

где σ – удельная хроматическая дисперсия;

$\Delta \lambda$ – ширина спектра передаваемого оптического сигнала;

L – длина волоконно-оптической линии связи.

Ширину спектра передаваемого сигнала можно рассчитать по формуле:

$$\Delta \lambda = \frac{c \Delta f}{f^2} = \frac{\lambda^2 \Delta f}{c}, \quad (4)$$

где Δf – ширина полосы спектра передаваемого сигнала;

f – частота, на которой осуществляется передача информации;

c – скорость света;

λ – длина волны, на которой осуществляется передача информации.

Необходимо свести хроматическую дисперсию к минимуму и этим обеспечить необходимый технологический запас на старение волокна.

Наиболее распространены два способа борьбы с дисперсией. Первый из них – это регенерация оптического сигнала, осуществляемая путем преобразования сигнала в электрическую форму, его регенерации и обратного преобразования в оптическую форму. Для группового DWDM сигнала необходимо демультиплексировать сигнал на отдельные каналы и установить на каждый канал отдельный регенератор. После регенерации необходимо снова провести мультиплексирование всех передаваемых длин волн. Очевидно, что использование подобных регенераторов выгодно только в точке приема передаваемого сигнала. Применение таких регенераторов для компенсации дисперсии экономически не выгодно.

Второй способ борьбы с дисперсией не предусматривает преобразования в электрическую форму. Для компенсации дисперсии используются волокна, имеющие отрицательное значение хроматической дисперсии. Модуль удельной дисперсии такого волокна намного больше, чем у стандартного одномодового. Потому для компенсации дисперсии требуется намного меньший отрезок волокна, чем длина участка линии связи. Компенсация дисперсии производится путем вставки в кабель модуля с волокном компенсации дисперсии. **Модули компенсации дисперсии (DCM)** поставляются вместе с оборудованием. Использование такого метода не требует демультиплексирования составного оптического сигнала. Также следует отметить, что данный метод борьбы с дисперсией не накладывает никаких ограничений на скорость и форму передаваемого сигнала.

Для компенсации хроматической дисперсии используют волокно со следующими параметрами: $S_0 = 0,75$ пс/(нм²·км); $\lambda_0 = 1750$ нм.

Используя формулы (2) и (3), найдем длину волокна, необходимую для компенсации хроматической дисперсии всей линии связи:

$$L_k = \frac{-\tau_{xp}}{\frac{\Delta\lambda S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right]} \quad (5)$$

Оптимальным будет установка нескольких модулей компенсации, которые включаются между каскадами оптических усилителей платы оптического интерфейса. Так, минимизируется влияние затухания волокна компенсации дисперсии на передаваемый сигнал. Два модуля DCM можно установить на оконечных пунктах волоконно-оптической линии связи, а остальные – совместно с оптическими усилителями. Хроматическая дисперсия одного такого модуля составляет

$$\tau_k = L_k \cdot \frac{\Delta\lambda S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right] \quad (6)$$

На рисунке 4 приведен график изменения хроматической дисперсии оптического сигнала на протяжении волоконно-оптической линии связи для структурной схемы, предложенной в качестве примера в предыдущей практической работе. Регенератор производит оптико-электрическое преобразование с сигналом, поэтому дисперсию на участке волоконно-оптической линии связи до регенератора необходимо компенсировать до нуля, как и до приемной системы передачи.

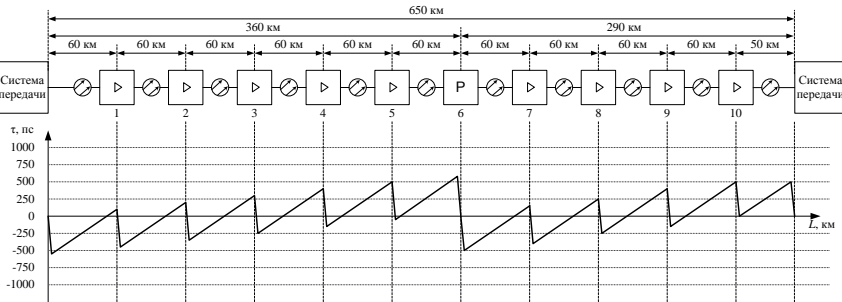


Рисунок 4 – График изменения хроматической дисперсии оптического сигнала на протяжении волоконно-оптической линии связи

Для построения графика на рисунке 4 приняты следующие исходные данные:

- протяженность волоконно-оптической линии связи, $L = 650$ км;
- хроматическая дисперсия на участке волоконно-оптической линии связи протяженностью 60 км, $\tau_{xp}(60) = 650,57$ пс;

– хроматическая дисперсия на участке волоконно-оптической линии связи протяженностью 50 км, $\tau_{\text{хр}}(50) = 542,14$ пс;

– хроматическая дисперсия одного модуля компенсации на участке до регенератора, $\tau_{\text{к1}} = 557,57$ пс;

– хроматическая дисперсия одного модуля компенсации на участке после регенератора, $\tau_{\text{к2}} = 524$ пс.

Порядок выполнения работы

1 Изучить краткие сведения из теории.

2 В соответствии с шифром выбрать из таблицы 2 наклон дисперсионной кривой одномодового волокна на длине волны нулевой дисперсии и длину волны нулевой дисперсии.

Таблица 2 – Исходные данные для расчета дисперсии оптического сигнала

Первая цифра шифра	Наклон дисперсионной кривой одномодового волокна на длине волны нулевой дисперсии (S_0), пс/(нм ² ·км)	Последняя цифра шифра	Длина волны нулевой дисперсии (λ_0), нм
0	0,068	0	1260
1	0,071	1	1270
2	0,074	2	1280
3	0,077	3	1290
4	0,080	4	1300
5	0,083	5	1305
6	0,086	6	1310
7	0,089	7	1315
8	0,092	8	1320
9	0,095	9	1325

3 Используя исходные данные предыдущей практической работы, в соответствии с шифром рассчитать удельную хроматическую дисперсию, ширину спектра передаваемого сигнала и хроматическую дисперсию по формулам (2)–(4).

4 Разделить волоконно-оптическую линию связи на подучастки, которые ограничиваются оконечными системами передачи и регенераторами. Для каждого подучастка определить количество модулей компенсации дисперсии, которые будут устанавливаться на всех усилителях, а также на устройствах, ограничивающих подучастки (системы передачи и регенераторы).

5 Используя формулы (5) и (6), рассчитать дисперсию модулей компенсации и всех элементарных отрезков волоконно-оптической линии связи между ними для каждого из подучастков волоконно-оптической линии связи.

6 Построить график изменения хроматической дисперсии оптического сигнала на протяжении волоконно-оптической линии связи, совмещенный со

структурной схемой расположения линейного оборудования, составленной в предыдущей практической работе.

Содержание отчета

1 Цель работы.

2 Результаты расчета удельной хроматической дисперсии, ширины спектра передаваемого сигнала и хроматической дисперсии оптического сигнала.

3 Результаты расчета дисперсии модулей компенсации и всех элементарных отрезков волоконно-оптической линии связи между ними для каждого из подучастков волоконно-оптической линии связи.

4 График изменения хроматической дисперсии оптического сигнала на протяжении волоконно-оптической линии связи, совмещенный со структурной схемой расположения линейного оборудования.

5 Вывод по работе.

Контрольные вопросы

1 Что такое дисперсия оптического сигнала?

2 Виды дисперсии.

3 Назначение оптических волокон со смещенной дисперсией.

4 Назначение оптических волокон с ненулевой смещенной дисперсией.

5 Способы борьбы с дисперсией.