

ОКНО РАБОТОСПОСОБНОСТИ И ДИСПЕРСИОННАЯ ДЛИНА

© 2016 г. Э.Л. ПОРТНОВ, Т.Д. ФАТХУЛИН

Московский технический университет связи и информатики
e-mail: aquiline17@yandex.ru

В работе рассматриваются окно работоспособности одномодовых оптических волокон в системе ВОСП-СР по результатам его влияния на дисперсионную длину при увеличении числа каналов, скорости передачи, методов модуляции, хроматической и поляризационной модовой дисперсий, нелинейных воздействий, изменения мощности и отношения сигнал/шум. Цель доклада - показать, что если не принимать соответствующих мер по защите от негативных воздействий, характеристики передачи значительно изменятся и может произойти потеря информации. Эти изменения отразятся на дисперсионной длине. В заключении даны рекомендации по ослаблению или устранению негативных воздействий на сигнал.

Ключевые слова: окно работоспособности, скорость передачи, дисперсионная длина, хроматическая и поляризационная модовая дисперсии, формат модуляции, нелинейности, мощность.

Согласно предлагаемому окну работоспособности (рис. 1) на передачу сигналов по оптическому волокну влияет большое значение различных параметров: битовая скорость, формат модуляции, число каналов, суммарная мощность передаваемых сигналов, хроматическая и поляризационная модовая дисперсии и нелинейности [1]. Эти влияния могут быть отражены на дисперсионной длине. Скорость передачи в одном канале можно увеличить при увеличении числа каналов до 1000 по одному оптическому одномодовому волокну. При этом скорость в каждом канале не превысит 3,5 Гбит/с, а межканальный интервал уменьшится до 3,125 ГГц [3]. Это приводит к межканальным влияниям. Согласно рекомендациям G694.1 Международного союза электросвязи по телекоммуникациям при увеличении скорости передачи до 10 Гбит/с и выше межканальный интервал не может быть меньше 6,25 МГц, так как возрастают межканальные влияния, а при 40 Гбит/с межканальный интервал может быть 100 ГГц.

Внедрение каналов связи на скорости ≥ 40 Гбит/с увеличивает вредное воздействие на каналы данных таких ухудшений качества передачи по волокну, как хроматическая дисперсия (ХД), поляризационная модовая дисперсия (ПМД) и нелинейность [2].

Эффект ХД увеличивается как квадрат увеличения скорости передачи, что делает ХД важным фактором для систем ≥ 40 Гбит/с по сравнению с системами с более низкой скоростью. Небольшие погрешности в компенсации дисперсии приведут к серьезной потере мощности. В этом случае дисперсионная длина изменится

$$L_d = 1/B^2 \beta_2$$

Для систем ВОСП-СР на хроматическую дисперсию оказывает влияние:

- увеличение числа каналов,
- уменьшение шага между каналами.

Влияние хроматической дисперсии уменьшается с уменьшением параметра D и при компенсации хроматической дисперсии.

ПМД – серьезное ухудшение при высоких скоростях передачи. ПМД основана на том факте, что некоторый сигнальный спектральный компонент оптических данных

распространяются вдоль двух различных основных состояний поляризации (ОСП) внутри неконцентрической симметричной сердцевинки волокна [4], и эти две спектральные копии движутся по волокну с незначительно различающимися скоростями. ПМД накапливается как вдоль волокна, так и при любом небольшом двулучепреломлении многих встроенных в канал компонентов вследствие их врожденной природы. Вредные эффекты ПМД являются стохастическими, изменяясь во время, зависимы от вибрации и температуры.

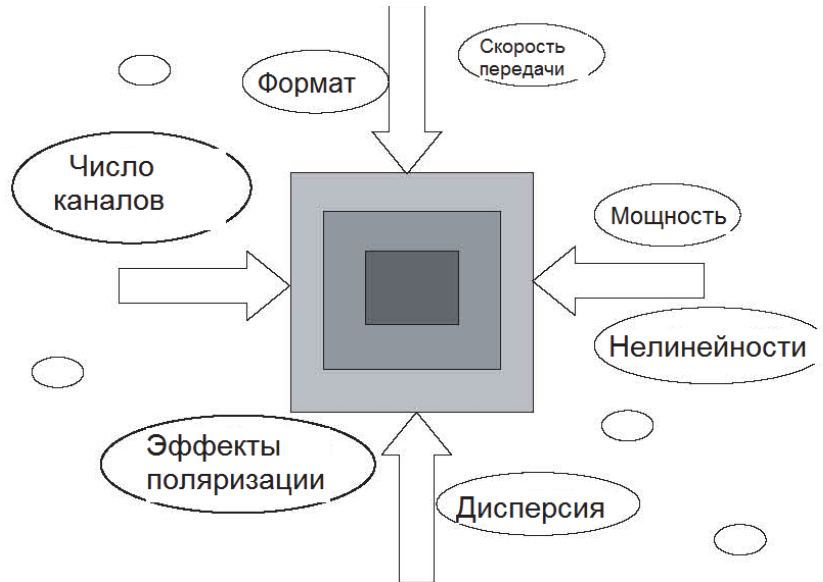


Рис. 1. Сжатие окна работоспособности при усложнении систем.

Реально считается, что усилители и каждый компенсатор вносят свой вклад в суммарную величину ПМД: усилитель – 0,5 пс, компенсатор -1 -2 пс в зависимости от длины волокна для компенсации.

При каждой скорости передачи должна соблюдаться норма по ПМД $0,1 T_6$ при длине линии без учета элементов линии или дифференциальная групповая задержка будет превышать величину 2,55 ПМД.

Потери мощности при раскрытии глазковой диаграммы определяются выражением:

$$P = 15(\text{ДГЗ} \cdot V)^2, \text{ дБ}$$

при формате модуляции NRZ.

При потерях мощности в 1 дБ $\text{ДГЗ}_{\text{max}} = 0,26 \text{ Тб}$. В этом случае система может отказать. Вероятность отказа $10^{(-6)}$ – 30с в год.

Поляризационная модовая дисперсия проявляется в одномодовом волокне вследствие несовершенства ОВ. В одномодовом ОВ действует мода HE₁₁, а при учете линейной поляризации присутствуют две взаимно ортогональные моды.

Влияние ПМД возрастает: с увеличением скорости передачи в канале, с увеличением числа каналов, с увеличением длины пролета.

Учесть поляризационную модовую дисперсию можно в дисперсионной длине

$$L_d = 1/B^2 8 (1,1\beta_2)$$

Формат модуляции учитывается в дисперсионной длине

$$L_d = dm/B^2 8\beta_2$$

Ключевыми методами для уменьшения эффектов нелинейности являются поддержание достаточно низкой мощности канала и использование тщательно разработанного распределения ХД так, чтобы дисперсия разрушала совпадение фаз, необходимое для аккумуляции каких-либо нелинейных эффектов. Любые изменения в

мощности канала или ХД может драматично подействовать на целостность каналов данных [5].

Отношение мощности канала к шуму усиленной спонтанной эмиссии (ASE), сгенерированной усилителем на волокне, легированном эрбием (EDFA), должно поддерживаться на довольно высоком уровне по всей протяженности передающего канала, чтобы гарантировать безошибочное восстановление данных. Большей частью накопление шума зависит от баланса входной мощности и коэффициента усиления, таким образом, для оптимального ОСШ в определенной степени даже желательно насыщение EDFA [7].

Введенное понятие дисперсионной длины и параметра дисперсии групповых скоростей β_2 позволяет сразу определить Qo- фактор, который устанавливает связь между дисперсионной длиной, допустимыми нормами и вероятностью ошибки [6].

Связь между параметром D(коэффициент хроматической дисперсии) и β_2 (дисперсия групповых скоростей) определена выражением:

$$D = - 2\pi c \beta_2 / \lambda^2$$

В этом случае Q-фактор в оптическом канале определяется выражением:

$$xQ_0 = T_b / \sqrt{\beta_2} l + y \beta_2 \sqrt{l}$$

При этом, следует учитывать, что мощность в оптическом канале P_o равна мощности в электрическом канале P_e

$$Q_0 = \sqrt{OCS} = \sqrt[4]{Q_e}$$

Эмпирическое выражение для ООСШ представлено для длины волны 1550нм следующим выражением:

$$ООСШ(дБ) = 58 - 10 \lg N - NF - 10 \lg L + P_{out} - 10 \lg M - K$$

M – число каналов, N – число усилителей, L – потери на один пролет, NF – шум усилителя, $P_{вых}$ -выходная мощность усилителя, K – другие факторы.

$$20 \lg Q_e = 5 \lg Q_e + \alpha l + A_{хд}$$

так как $OCS_e = 20 \lg Q_e$, а $OCS_o = 20 \lg Q_0$

$$Q_0 = \sqrt[4]{Q_e} = T_b / x \sqrt{\beta_2} l$$

При требуемом $Q_e = 7$, $Q_0 = 1,627$ $A_{хд} = 2$ дБ, $A_z = 11$ дБ, формате модуляции NRZ, $x=2$, а β_2 (дисперсия групповых скоростей) и l (длина регенерационного участка) в данном выражении взаимозависимы. В этом случае не учитывается влияние поляризационной модовой дисперсии, значение которой может уменьшить дисперсионную длину.

Отношение сигнал/шум учитывается в дисперсионной длине через фактор Q

$$L_d = d_m Q / B^2 \beta_2 Q^2$$

Нелинейные эффекты ограничивают передачу и зависят от ряда факторов: скорости передачи, оптической мощности, оптического волокна, формата модуляции.

Реально нелинейные эффекты также можно учесть в дисперсионной длине:

$$L_d = d_m Q \lambda^2 A_{эф} n^2 P_0 / B^2 (1, \beta_2) Q^2 n^2 P_0 \lambda^2 A_{эф}$$

При достижении дисперсионной длиной значения равного длине регенерационного участка за счет упреждающей коррекции ошибки, компенсации хроматической и поляризационной модовой дисперсий и различных форматов модуляции получаем возможность работать на высоких скоростях передачи с применением ВОСП-СР без значительных отказов системы.

Изменение групповой задержки с частотой –результат дисперсии, которая определяется как

$$D = dt_g / d\lambda = - 2\pi c d^2 \beta / \lambda d^2 \omega = \lambda d^2 n_{эф} / c d \lambda^2 = - 2\pi c \beta_2 / \lambda^2$$

Где λ - длина волны, c - скорость света в вакууме, $n_{\text{эфф}}$ – эффективный индекс моды в ОВ.

При компенсации дисперсии вводится ОВ с противоположным знаком дисперсионного параметра D . Результирующее значение дисперсии определяется:

$$D_T = D_1 L_1 + D_2 L_2'$$

Где D_1, L_1 – значения дисперсии и длины ОВ передачи, D_2, L_2 – значения дисперсии и длины ОВ компенсации.

Изменение дисперсии с длиной волны хорошо аппроксимируется 3-х элементным рядом Тейлора:

$$D = D_0 + S(\lambda - \lambda_0) + C(\lambda - \lambda_0)^2,$$

где $S = dD/d\lambda$ –наклон дисперсионной характеристики,

$C = (1/2)d^2D/d\lambda^2$ -кривизна дисперсионной характеристики. Для систем ВОСП-СР должны быть рассмотрены наклон и кривизна дисперсионной характеристики. Для большинства ОВ кривизна дисперсионной характеристики может быть представлена линейной функцией и кривизной можно пренебречь. Для линейной дисперсионной функции мы введем параметр K , который составляет отношение

$$K = D/S$$

Одновременная компенсация дисперсии и наклона требует $K_1 = K_2$. Для точной компенсации с учетом кривизны необходимо $C_1 = C_2$.

В добавок к кривизне дисперсионной характеристики необходимо учесть и ряд других факторов: ОВ для компенсации должны иметь большое значение отрицательной дисперсии и низкое значение затухания. Это описывается соотношением:

$$F = D/\alpha$$

Затухание определяется как известно:

$$A = \text{апоглощение} + \text{арассеяние} + \text{анесовершенства} + \text{аизгиба}$$

Арассеяние –линейное рассеяние или Релеевское рассеяние.

К Релеевскому рассеянию или линейному рассеянию добавляется нелинейные рассеяния за счет Бриллюэновского рассеяния, за счет акустических фононов и Рамановского рассеяния за счет оптических фононов.

Составляющая нелинейной меры описывается выражением

$$F_{\text{нл}} = (\gamma_1/\gamma_2)(A_2\alpha_2 (L_1-1)^2/A_1\alpha_1 L_1)(L_2/(L_2-1)^2)$$

$$L_1 = e^{(\alpha_1 L_1)} / L_2 = e^{(\alpha_2 L_2)} = e^{(\alpha_2 L_1 D_1/D_2)}$$

Нелинейные эффекты проявляются в виде: нелинейных эффектов, связанных с эффектами рассеяния (Бриллюэна и Рамана), Эффектами Керра: фазовой самомодуляции, фазовой Кросс-модуляции, четырехволнового смешивания, модуляционной нестабильности и формирования солитона [8].

Из всех нелинейных эффектов вынужденное рассеяние Бриллюэна имеет наименьшую пороговую мощность и ,следовательно, ограничивает переданную световую мощность в волокне.

Вынужденное рассеяние Рамана имеет более высокую пороговую мощность, чем рассеяние Бриллюэна и излучение света сдвинуто в область более низких частот с более широкой полосой. При этом происходит перераспределение мощности из коротковолновых в длинноволновые каналы. Этот эффект используется в качестве усиления в системах ВОСП-СР.

Эффект Керра проявляется в изменении коэффициента преломления под действием квадрата напряженности электрического поля.

Когда выходной уровень источника становится большим, сигнал модулирует собственную фазу. Это приводит к уширению переданного импульса и временному расширению или сужению сигнала, в зависимости от знака хроматической дисперсии. Это приводит к сдвигу фронта импульса в сторону длинных волн и срез импульса в сторону коротких волн. В системах ВОСП-СР с малым шагом между каналами спек-

тральное уширение под действием самофазовой модуляции может вызвать интерференцию между каналами (кросс-модуляция). Этот эффект может управляться компенсацией дисперсии. Для длинных линий ограничением являются самофазовая модуляция, кросс-модуляция и четырехволновое смешивание, которые генерируют сигналы искажений и переходный разговор, которые не могут быть убраны на приемнике. Хроматическая дисперсия и ПМД генерируют межсимвольные искажения. Параметры D (пс/нм.км), S (пс/нм².км), $A_{\text{эфф}}$ (мкм²) и спектральное затухание передачи (дБ/км) могут быть оптимизированы для специальных системных архитектур. Нелинейные искажения уменьшают отношение сигнал/шум на приемнике. Нелинейный переходный разговор не позволяет увеличить P канала и получить требуемую величину отношения сигнал/шум. n_2 , D , $A_{\text{эфф}}$ определяют нелинейный переходный разговор, создаваемый для требуемых расстояний между каналами DWDM системы. $\gamma=2\pi \cdot n_2/\lambda A_{\text{эфф}}$ (1/Вт.км)

Выводы

При переходе со скорости передачи с 10 Гбит/с на скорость передачи 40 Гбит/с требования к ООСШ повышается на 6 дБ, ПМД возрастает в 4 раза, влияние хроматической дисперсии возрастает в 16 раз, увеличивается влияние нелинейных эффектов. Нелинейные эффекты ограничивают передачу и зависят от ряда факторов: скорости передачи, оптической мощности, оптического волокна, формата модуляции.

Уменьшить или ограничить это влияние можно выбором ОВ, выбором формата модуляции, оптической фазовой конфигурацией, дисперсионным решением, электронной техникой. Следует отметить, что коэффициент битовых ошибок возрастает при увеличении вводимой в ОВ мощности из-за нелинейности ОВ [9].

Уровень ЧВС чувствителен к увеличению оптической мощности в канале, к увеличению числа каналов, к уменьшению шага между каналами, к уменьшению абсолютной величины хроматической дисперсии.

Модуляционная неустойчивость (МН) приводит к превращению непрерывного сигнала в модулированную структуру в режиме аномальной дисперсии. Сдвиг частот и усиление боковых полос определяется интенсивностью исходной волны, а также дисперсией и нелинейными коэффициентами ОВ. МН можно рассматривать как частный случай ЧВС, где 2 фотона входного сигнала преобразуются в 2 фотона с разными частотами. МН может уменьшить отношение сигнал/шум. Применение фильтров или самофильтрации в системах большой протяженности позволяет решить эту проблему. Управление дисперсией и снижение уровня мощности, применение лазеров с внешней модуляцией также приводят к уменьшению МН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Агравал Г.* Нелинейная волоконная оптика. – М.: МИР, 1996, 323 с.
2. *Фриман Р.* Волоконно-оптические системы связи. – М.: Техносфера, 2003, 440 с.
3. *Kaminow I.P., Koch T.L.* Optical fiber Telecommunication IIIA. Academic Press 1997. San Diego. 595 p.
4. *Agrawal G.P.* Fiber-optic communication systems. Second edition John Wiley and Sons № 4 1997, 555 p.
5. *Иванов А.Б.* Волоконная оптика. Компоненты, системы передачи, измерения. – М.: Syrus Systems, 1999, 627 с.
6. Волоконно – оптическая техника: Современное состояние, перспективы. 2ое издание переработанное и дополненное, под редакцией *Дмитриева С.А. и Слепова Н.Н.*, ООО “Волоконно-оптическая техника”, Москва, 2005, 575 с
7. *Портнов Э.Л.* Принципы построения первичных сетей и оптических кабельных линий. – М.: Горячая линия - Телеком, 2009, 544 с.
8. *Портнов Э.Л.* Оптические кабели и пассивные компоненты линий связи. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007, 464 с.
9. *Портнов Э.Л.* Оптические кабели связи, их монтаж и измерение. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2012, - 448с.: ил.