

Нелинейные модуляционные эффекты в оптических волокнах

Песков С.Н., зам. директора по науке компании “Контур-М”, к.т.н.,
Барг А.И., руководитель управления кабельного ТВ компании “Контур-М”,
Колпаков И.А., ген. директор компании “Контур-М”

Настоящая статья является заключительной по серии статей [1-3], посвященным рассмотрению нелинейных эффектов, возникающих в оптических волокнах (ОВ).

Эффект Бриллюэновского рассеяния – SBS [1] и Рамановского рассеяния – SRS [2] были в основном связаны с оптическими явлениями рассеяния света. Четырехволновое смешение – FWM [3] обязано уже эффекту нелинейности рефракционного индекса n , т.е. его зависимости от уровня проходящей оптической мощности.

Ниже рассмотрены модуляционные эффекты, также связанные с нелинейным показателем преломления n .

Фазовая самомодуляция (SPM – Self-Phase Modulation), также как и FWM, возникает из-за зависимости рефракционного индекса n от интенсивности света (эффект Керра). Явление SPM рассматривается, в основном, применительно к цифровым ВОЛС, работающим на высоких скоростях (например, 2,5 Гбит/с), т.е. при малых длительностях импульсов (менее 200...400 пс). SPM начинает проявляться в ОВ при мощностях, более 8...10 мВт и не зависит от частотной канальной расстановки или числа каналов. Разумеется, данный порог весьма условен, т.к. в значительной степени зависит от типа ОВ.

Как известно из теории цепей, спектр импульса связан с его длительностью и, особенно, с крутизной переднего и заднего фронтов. Согласно обратному преобразованию Фурье, передний фронт обязан высокочастотным составляющим в спектре сигнала (т.е. более коротким длинам волн), а задний фронт – низкочастотным составляющим, см. рис.1. При прохождении оптического импульса вдоль ОВ меняется его амплитуда. Следовательно, изменяется и величина рефракционного индекса n , как нелинейного элемента, зависящего от интенсивности света в конкретном сечении по длине волокна. Очевидно, что мощность импульсного сигнала можно рассматривать как временную функцию, т.е. изменение энергии сигнала во времени. Коль скоро меняется интенсивность оптического света (I) по времени, то также во времени будет меняться и индекс рефракции:

$$n = n_0 + n_n I(t) . \quad (1)$$

После прохождения импульсом с несущей частотой ω_0 определенного расстояния L , неизбежно произойдет изменение его фазы:

$$\varphi_n(t) = \delta_n \cdot L \omega_0 / C , \quad (2)$$

где δ_n – изменение величины рефракционного индекса (может быть как положительным, так и отрицательным):

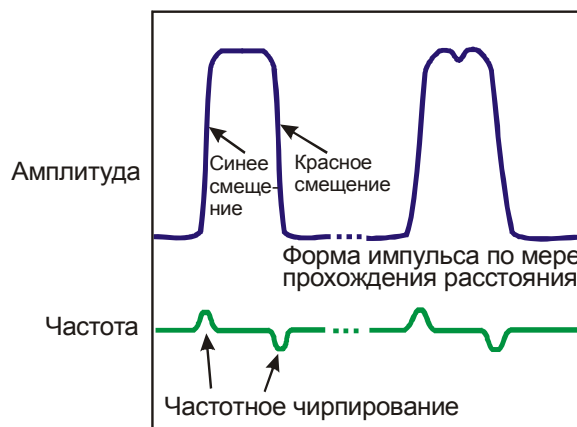


Рис.1

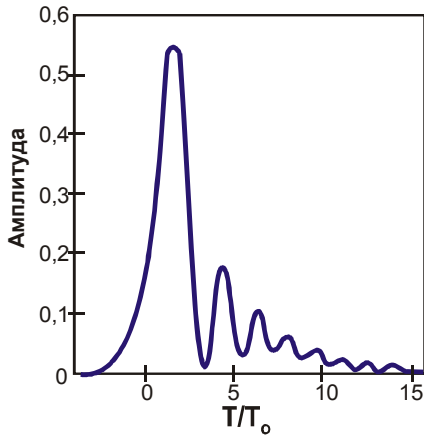


Рис.2

$$\delta_n = n_n \cdot I(t)^2 . \quad (3)$$

Следует отметить, что энергия импульса минимальна на его переднем фронте и максимальна на его заднем фронте. Следовательно, изменение величины рефракционного индекса (следовательно, спектра и формы сигнала) будет претерпевать максимальные изменения именно на заднем фронте импульса, сильно искажая его форму (но не саму длительность). Отсюда вытекает и само название данного вида искажений – “фазовая самомодуляция”. На рис.2 представлены осцилляции на заднем фронте импульса за счет SPM.

В силу того, что частота в математическом представлении представляет собой производную фазы по времени ($\Delta\omega = d\varphi/dt$), то сам импульс оказывается промодулированным не только по амплитуде, но и по частоте:

$$\omega(t) = \omega_0 + d\omega(t) = \omega_0 + d\varphi_n(t)/dt . \quad (4)$$

Эффект кратковременного изменения несущей частоты чирпированием по частоте (см. рис.3). При $n_n > 0$ наблюдается понижение частоты, а при $n_n < 0$ – повышение частоты. Явление SPM хорошо изложено в [5].

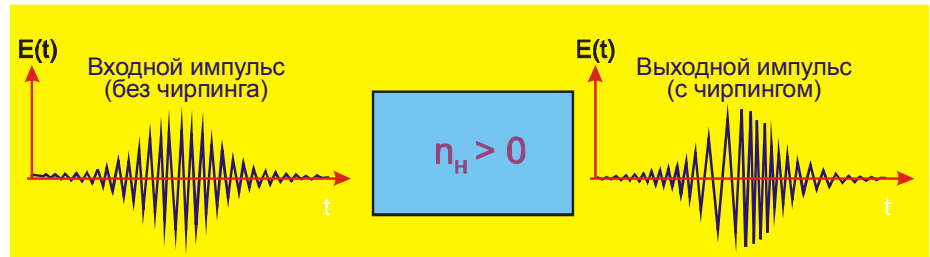


Рис.3

Отметим важный практический момент, что эффект SPM приводит к появлению чирпинга примерно также, как и при распространении импульса в волокне с дисперсией (например, с SMF-28 на 1550 нм). Однако между этими явлениями имеются существенные отличия. Эффект SPM вызывает расширение спектра импульса (нелинейные искажения), но не меняет длительность импульса⁶. Дисперсия же, наоборот, приводит к изменению длительности импульса, но не меняет ширину его спектра (линейные искажения).

Из практических результатов использования можно отметить, что лазеры с непосредственной модуляцией обладают эффективностью уширения спектра того же порядка, как и SPM эффекты в ОВ и могут использоваться для трансляции цифровых сигналов со скоростями до 2,5 Гбит/с на расстояниях до 170...200 км при использовании SMF-28 с 2 dB или меньшим влиянием. Для более протяженных магистралей или при использовании более высоких скоростей передачи, потребуются уже лазеры с поглощающей или внешней модуляцией.

⁶ По факту, за счет сильного искажения заднего фронта наблюдается обужение импульса. Так, при длительности импульса в 10...20 пс, обужение может достигать двух-трех и более раз, в результате чего импульсы могут даже раздваиваться [4]. Все это приводит к резкому увеличению BER, в результате чего высокоскоростная передача цифровой информации становится затруднена

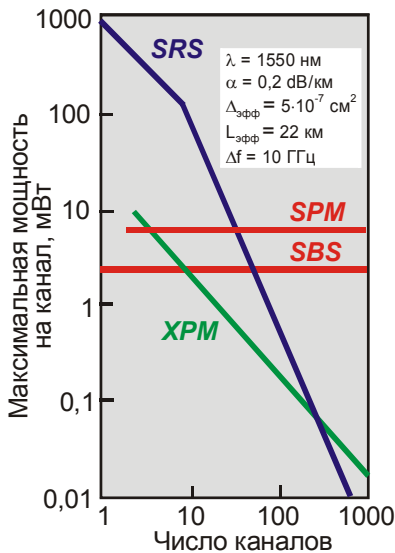


Рис.4

искажений) и, по возможности, снижать канальный уровень оптической мощности (см. рис.4). Важно также отметить [5], что XPM приводит также к появлению амплитудных искажений временного джиттера (рис.5). Эти искажения проявляются тем сильнее, чем выше скорость передачи сигнала и меньше интервал частот между каналами. Исследования в этом направлении стали интенсивно проводиться только в самое последнее время.

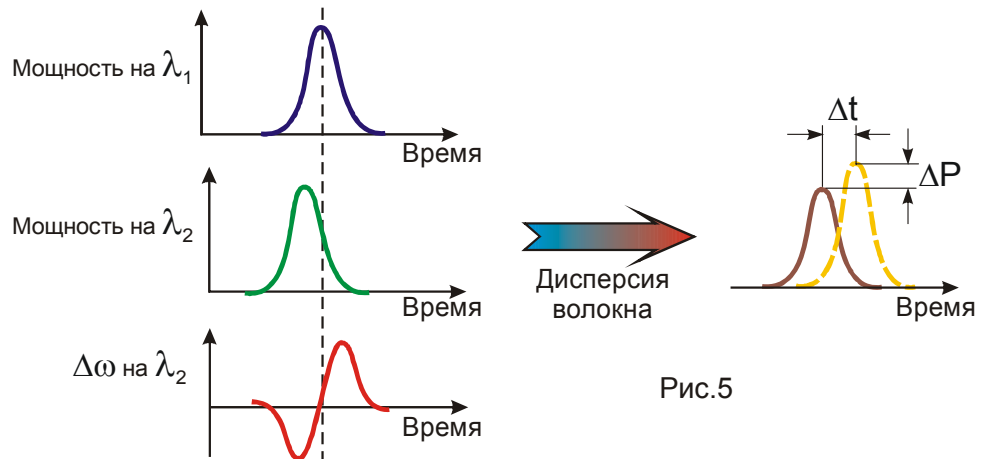


Рис.5

Интермодуляция (IM – Inter Modulation) аналогична SPM и XPM, но рассматривается для нескольких каналов. Как и в выше рассмотренных случаях, величина рефракционного индекса изменяется пропорционально интенсивности оптической мощности (см. выражение

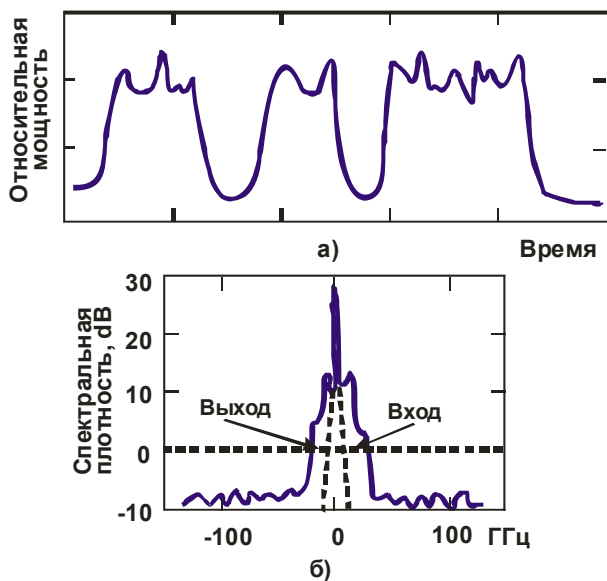


Рис.6

1). Так, например, если в ОВ присутствуют две независимые волны λ_1 и λ_2 , то n будет изменяться синхронно их суммарной мощности, что вызовет появление комбинационных составляющих, т.е. новых двух волн, близлежащих по частотному диапазону: $\lambda_{12} = 2\lambda_1 - \lambda_2$ и $\lambda_{21} = 2\lambda_2 - \lambda_1$. Такое явление подобно множеству способов формирования нелинейности при FWM.

Модуляционная нестабильность (MI – Modulation Instabliting) наблюдается только в ОВ с положительной дисперсией [5]. Во временном представлении MI проявляется в виде пиков на импульсах (рис.6а), а в спектральном – как уширение спектра импульса (рис.6б).

Появление пиков на импульсах связано

с эффектом самовоздействия волн. Этот эффект приводит к тому, что длина волны на заднем фронте импульса оказывается короче длины волны на переднем фронте. Волокно с положительной дисперсией ускоряет волну заднего фронта сильнее, чем более длинную волну переднего фронта. Когда задний фронт входит во взаимодействие с передним фронтом, возникает интерференция, которая и служит причиной образования пиков на передаваемых импульсах. После взаимодействия с передним фронтом, возникает интерференция, которая и служит причиной образования пиков на передаваемых импульсах. После детектирования оптического сигнала и последующей электрической фильтрации амплитуда пиков уменьшается так, что они не оказывают существенного влияния на работу систем протяженностью менее 1000 км.

Таким образом, проведен обзор нелинейных эффектов, возникающих в ОВ при больших уровнях оптической мощности. Все нелинейные эффекты, возникающие в ОВ, обязаны или явлению рассеяния (SBS и SRS) или нелинейности рефракционного индекса n (FWM, SPM, XPM, IM и MI), т.е. его зависимости от уровня вводимой оптической мощности.

Знание принципов возникновения нелинейных искажений позволит правильно выбрать не только тип ОВ, но и правильно спроектировать оптическую систему. Для более полного изучения механизмов возникновения искажений в ВОЛС, следует также ознакомиться и с линейными искажениями, в основном обусловленными хроматической и поляризационной дисперсиями

Из всех четырех публикаций (см. также 1-3) видно, что все нелинейные эффекты в сильной степени зависят от типа используемого ОВ. Ниже приведены краткие сведения по основным типам оптических волокон, используемых в настоящее время.

Стандартное одномодовое волокно IEC 60793-2 B1.1 & B1.3 / ITU G.652

Стандартное одномодовое волокно по сути представляет собой тонкую (5-8 мкм) сердцевину из стекла, легированного германием, окруженную более толстым слоем чистого стекла. Стандартное одномодовое волокно является основополагающим компонентом оптической телекоммуникационной инфраструктуры.

Почти все решения могут быть реализованы с помощью одномодового волокна, но оно оптимизировано для передачи сигнала на длине волны 1310 нм. Несоответствие эксплуатационных качеств со стандартами для одномодового волокна становится особенно значительным на высоких скоростях передачи (10 Гбит/с) и больших расстояниях (> 40 км).

Одномодовое волокно с низким пиком водяного поглощения (IEC тип B1.3) имеет такие же дисперсионные характеристики, как и стандартное одномодовое волокно (IEC тип B1.1), но меньшее поглощение в области водяного пика (обычно 1383 нм). Поскольку никакой спецификации водяного поглощения для стандартного одномодового волокна (IEC тип B1.1) не существует, поглощение в области 1383 нм может быть значительно больше, чем на 1310 нм.

За счет меньшего количества водяных примесей, вносимых в процессе изготовления, одномодовое волокно с низким пиком водяного поглощения (IEC тип B1.3) обеспечивает все то же самое, что и стандартное одномодовое волокно, но к тому же поддерживает дополнительные длины волн между 1360 и 1460 нм.

Заметим еще раз, что стандарт IEEE 802.3ae для 10 Gigabit Ethernet описывает все эксплуатационные характеристики для стандартных типов одномодовых волокон (IEC типы B1.1 и B1.3). Дополнительные типы волокон (например, DSF или NZDSF) могут давать преимущества, выходящие за рамки стандарта, но они не требуются для соответствия техническим характеристикам стандарта 10GbE.

Волокно со смещенной дисперсией (DSF) – IEC 60793-2 B2 / ITU G.653

Волокно со смещенной дисперсией (DSF) было предложено в середине 1980-х и составляет очень небольшой процент от всего используемого одномодового волокна. К потребности в DSF привела разработка 1550 нм лазеров, излучение которых имеет меньшее поглощение в волокне, чем у 1310 нм лазеров. DSF позволяет оптическим сигналам распространяться значительно дальше без регенерации или компенсации благодаря уменьшенному значению коэффициента хроматической дисперсии.

DSF хорошо приспособлено для удовлетворения потребностей одноканальных оптических систем передачи. Но с появлением широкополосных оптических усилителей и волнового мультиплексирования (DWM), хроматические дисперсионные характеристики DSF стали вносить нежелательные эффекты в целостность многоволновых импульсов. В результате потребовался новый тип волокна – волокно с ненулевой смещенной дисперсией (NZDSF). NZDSF фактически вывело из употребления DSF И, таким образом, DSF больше не предлагается на коммерческом рынке.

Волокно DSF не описано в стандарте IEEE 802.3ae.

Одномодовое волокно со смещенной длиной волны отсечки – IEC 60793-2 B1.2 / ITU G.654

Одномодовое волокно со смещенной длиной волны отсечки создано для того, чтобы позволить передачу данных на большие расстояния с низким затуханием и возможностью использовать сигналы высокой мощности. Это волокно обычно используется для передачи в области 1550 нм благодаря большой величине длины волны отсечки (около 1500 нм).

Из-за высокой сложности изготовления одномодовое волокно со смещенной длиной волны отсечки обычно намного дороже, чем другие одномодовые волокна. Оно используется практически исключительно в подводных решениях, и его маловероятно встретить в ситуации, когда применяются решения 10 Gigabit Ethernet.

Волокно со смещенной длиной волны отсечки не описано в стандарте IEEE 802.3ae.

Волокно с ненулевой смещенной дисперсией (NZDSF) – IEC 60793-2 B4 / ITU G.655

Волокно с ненулевой смещенной дисперсией (NZDSF) начали применять в середине 1990-х для устранения недостатков, связанных с использованием DSF при передаче на нескольких длин волн. В этом волокне поддерживается ограниченный коэффициент хроматической дисперсии во всем оптическом диапазоне (обычно 1530-1625 нм), используемом в волновом мультиплексировании (WDM).

В первую очередь, введение NZDSF было направлено на нелинейный эффект, который называется четырехволновым смещением (FWM). Суть FWM заключается в том, что три волны, несущие различную информацию, могут генерировать сигналы на четвертой длине волны. Если используется эквидистантная схема расположения каналов (как в большинстве WDM систем), то сгенерированные шумовые сигналы могут частично перекрывать длину волны, несущую полезную информацию. NZDSF смягчает этот эффект, обеспечивая для всех длин волн в рассматриваемом диапазоне (1530-1625 нм) некоторую ограниченную дисперсию таким образом, чтобы сигналы на соседних длин волн не перекрывались в течение больших промежутков времени.

Уменьшенная хроматическая дисперсия NZDSF также уменьшает и нежелательный вклад других нелинейных эффектов – фазовой автомодуляции (SPM) и перекрестной фазовой модуляции (XPM). NZDSF оптимизировано для передачи в диапазоне 1530-1625 нм, но поддерживает также некоторые конфигурации на длине волны 1310 нм с соответствующим типом лазеров и конструкцией системы.

Стандарт IEEE 802.3ae описывает NZDSF кратко: “Вероятно, волокно типа B4 (NZDSF) с положительной дисперсией может быть использовано для 10GBASE-E вместо

B1.1 или B1.3 (стандартное одномодовое волокно). Для соответствия ТРЗ должна иметь место линия связи с использованием волокна B4 (NZDSF) с отрицательной дисперсией”.

Название	ITU-T	IEC	Рабочий диапазон, нм	Описано в стандарте IEEE 802.3ae
Стандартное одномодовое волокно (с несмещенной дисперсией)	G.652	IEC 60793-2 (B1.1/B1.3)	1300-1324	Да
Волокно со смещенной дисперсией (DSF)	G.653	IEC 60793-2 (B2)	1500-1600	Нет
Волокно со смещенной длиной волны отсечки	G.654	IEC 60793-2 (B1.2)	1550-1625	Нет
Волокно с ненулевой смещенной дисперсией (NZDSF)	G.655	IEC 60793-2 (B4)	1530-1565 (C диапазон) 1565-1625 (L-диапазон)	Да

Авторы с удовольствием ответят на все вопросы или критические замечания по настоящей статье по E-mail: info@konturm.ru. Или непосредственно на форуме нашего сайта: www.konturm.ru.

Рекомендуемая литература

1. Песков С.Н., Барг А.И., Колпаков И.А. Эффект Бриллюэновского рассеяния в оптических сетях. Настоящий сайт.
2. Песков С.Н., Барг А.И., Колпаков И.А. Эффект Рамановского рассеяния в оптических волокнах. Настоящий сайт.
3. Песков С.Н., Барг А.И., Колпаков И.А. Эффект четырехволнового смешения в оптических волокнах. Настоящий сайт.
4. Скляр О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи, М., "Солон-Пресс", 2004, 272с.
5. Листвин А.В., Листвин В.Н., Швырков Д.В. Оптические волокна для линий связи, М., "ЛЕСАРпт", 2003, 288с.
6. Гринфилд Д. Оптические сети, М., "Тид-Дс", 2002, 256с.