

Н.А. Зенкин, д.т.н.
Ю.В. Цебро

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Киевский национальный университет технологий и дизайна, г. Киев, milanium@i.ua

Получена математическая модель опто-оптического преобразователя, которая требует понимания конструкций волокон и их параметров для внедрения в волоконно-оптических линиях связи.

Ключевые слова: связь, волоконная оптика, конструкция, параметры, внедрение.

Введение

Современный этап развития техники связи характеризуется проведением интенсивных разработок и внедрением волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) информации. Интерес к ним объясняется большими возможностями этой новой области техники. Вырабатываются принципы построения таких систем и реализации их компонентов, строятся и вводятся в эксплуатацию линии, создаются условия для широкого их внедрения на действующих сетях связи [1-3].

Актуальность применения ВОСП обусловлена рядом их преимуществ по сравнению с системами передачи, использующими кабели с металлическими жилами.

Основные преимущества ВОСП: высокая помехоустойчивость, нечувствительность к внешним электромагнитным полям и практически полное отсутствие взаимных влияний между отдельными волокнами многоволоконного оптического кабеля (ОК); потенциально большая широкополосность (информационная ёмкость); небольшая масса и габариты ОК. Это уменьшает стоимость и время прокладки ОК; полная электрическая развязка между входом и выходом системы связи, не требующая общего заземления передатчика и приёмника; надёжная техника безопасности ввиду отсутствия коротких замыканий – ОК могут быть использованы в пожароопасных и взрывоопасных условиях (шахты, метрополитены); потенциально низкая стоимость ОК [4].

Оптические волокна (ОВ) изготавливаются из сверхчистого стекла по сложной и дорогостоящей технологии, но в условиях массового производства их стоимость будет невысокой. Кроме того, при производстве ОК практически не используются такие дорогостоящие цветные металлы, как алюминий, свинец, запасы которых в основном исчерпаны.

Наряду с указанными преимуществами ВОСП имеются и недостатки: малая механическая прочность ОВ; зависимость передаточных свойств ОК от условий прокладки и эксплуатации; нежелательность совмещения в ОК оптических волокон и металлических проводников; сравнительно высокая стоимость [5, 6].

При проектировании ВОСП важно иметь информацию о влиянии параметров компонентов и subsystem на характеристики систем в целом [7].

Современным методом получения такой информации является моделирование на ЭВМ.

Постановка проблемы

Решение проблемы передачи информации по волоконно-оптической линии связи включают следующие обязательные составляющие: информационная ёмкость системы, выраженная в числе каналов связи, или скорость передачи информации, выраженная в бит в секунду; затухание, определяющее максимальную длину участка регенерации; стойкость к воздействию окружающей среды; при увеличении скорости в ВОСП информации мешает временная дисперсия прохождения оптического сигнала по волоконному тракту.

Отдельной и важнейшей задачей, которая остаётся на сегодняшний день это проблема четырехволнового смешения. Наиболее эффективный путь построения ВОСП со спектральным уплотнением — увеличение числа I-каналов. При увеличении дальности передачи приходится усиливать оптические сигналы в каждом I-канале, и при большой суммарной мощности в волокне начинают проявляться нелинейные эффекты.

Цель работы - проанализировать и обосновать предложенную математическую модель, позволяющую определить основные типы волокон и условие распространения волн по ним.

Результаты исследования

Выбор и надлежащее использование ООП требует понимания конструкций волокон и их параметров. Затухание сигнала в линейном тракте является важным фактором при разработке

любой системы связи. Все приемные устройства требуют, чтобы поступающая на их вход мощность, была выше некоторого минимального уровня, так что потери среды распространения ограничивают общую длину линии передачи [8]. Имеются определенные точки в оптической системе, где вносятся потери. Они возникают при вводе света в волокно, непосредственно в самом волокне и в соединениях (неразъемных и разъемных).

Рассмотрим причины потерь в самом волокне в интервале длин волн 0,5...1,6 мкм. В этом участке спектра работает большинство волоконно-оптических систем. Для этой области длин волн существуют волокна с малыми потерями, эффективные источники излучения и детекторы. Для других длин волн этого нет.

Волокно это, по сути, стекло. Стекло может быть неоднородным по составу – это смесь молекул SiO_2 , которые имеют изменения в пространственной ориентации молекул в различных точках материала. Это принципиально отлично от структуры кристаллов, в которых составляющие их атомы занимают фиксированные положения в пространстве, и эта структура периодически повторяется. Чтобы изменить значение показателя преломления, в стекло добавляют другие материалы. Обычно легирование выполняют титаном, таллием, германием, бором и другими химическими элементами. Основой является стекло с высоким содержанием двуоксида кремния, из которого может быть сформировано волокно с малыми потерями, если достигнута высокая химическая чистота.

Потери в стеклянных волокнах возникают вследствие поглощения, рассеяния и геометрических дефектов.

Даже самое чистое стекло поглощает свет внутри определенных областей спектра. Это собственное поглощение является естественным свойством стекол. Очень сильное собственное поглощение происходит в ультрафиолетовой части (на коротких длинах волн). Поглощение возникает вследствие сильных электронных и молекулярных переходов. Пик потерь наблюдается в ультрафиолетовой области. Эти потери уменьшаются с приближением к видимой области спектра.

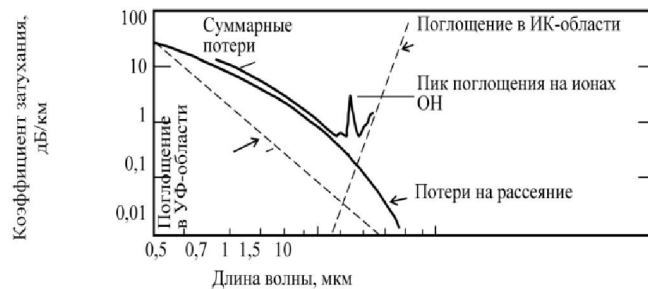


Рис. 1. Коэффициент затухания кварцевого ОВ, легированного германием

Ультрафиолетовое поглощение отстоит далеко от области, где эксплуатируются волоконные системы, так что их вклад незначителен. Конец хвоста ультрафиолетового поглощения может простираться в видимую область, но как уже отмечалось, вносит небольшой вклад в суммарное затухание в этой области спектра. Ультрафиолетовое поглощение показано на (рис. 1).

Пики собственного поглощения также имеются в инфракрасной области спектра. Для типичных составов стекол пики поглощения, расположенные между 7 мкм и 12 мкм, далеки от области, в которой работают волоконные системы. Инфракрасные потери связаны с колебаниями химических связей типа соединений кремния с кислородом. Тепловое возбуждение заставляет атомы постоянно перемещаться так, что химические связи SiO непрерывно расширяются и сжимаются. Эти колебания имеют резонансную частоту в инфракрасной области спектра. Как показано на (рис. 1), коротковолновая граница этого механизма поглощения простирается вниз по спектру, приближаясь к области, где функционируют волоконные системы. Инфракрасное поглощение вносит малые потери в верхней части участка спектра (вблизи 1,6 мкм), используемого для волоконной связи. Фактически эти потери исключают использование стеклянных волокон на более длинных волнах.

Можно заключить, что собственные потери обычно невелики в широкой спектральной области, где работают волоконные системы, но эти потери делают невозможным использование волоконных систем, как в ультрафиолетовом, так и более длинноволновом инфракрасном участке спектра.

В волоконных линиях связи имеются ограничения на дальность передачи по ослаблению (затуханию) и по допустимым искажениям формы импульсов. В некоторых случаях сигнал, достигающий приемного устройства, слишком слаб для качественного приема, хотя форма принятого сигнала удовлетворительна. Когда затухание в волокне является основной проблемой, то говорят, что система ограничена по мощности [9]. Для некоторых трактов мощность сигнала на приеме достаточна, но искажения формы сигнала препятствуют

безошибочному восстановлению передаваемого сообщения. Говорят, что такие системы ограничены шириной полосы пропускания.

В ступенчатом ОВ сигналы искажаются вследствие материальной и волноводной дисперсии и многомодового уширения импульсов. Величина уширения импульса из-за многомодовости в диэлектрическом полосковом волноводе равна:

$$\Delta(\tau/L) = n_1(n_1 - n_2)/(cn_2) \quad (1)$$

В терминах относительного изменения показателя преломления Δ и числовой апертуры NA это уширение может быть представлено в виде:

$$\Delta(\tau/L) = \frac{n_1}{c} \Delta = \frac{NA^2}{2cn_1}, \quad (2)$$

где n_1 и n_2 близкие по величине. Используя типичные значения для кварцевых волокон $n_1 = 1,48$ и $n_2 = 1,46$, находим, что $\Delta(\tau/L) = 67$ нс/км. Это довольно большое значение. Экспериментально полученные значения уширения импульсов для большинства ступенчатых ОВ из кварца дают несколько меньшие значения – 10...50 нс/км. Расхождение возникает вследствие нескольких причин: перемешивания мод и преимущественного затухания высших мод. Перемешивание мод обусловлено обменом мощности между модами в процессе их распространения. Луч некоторой моды может отклоняться (на изгибах и в соединителях) и попадать на траекторию другой моды. На неоднородностях лучи могут преобразовываться из мод низшего порядка в моды высшего порядка и наоборот. В результате такого непрерывного перемешивания мод энергия, переносимая любой из мод, распространяется по зигзагообразной траектории, которая находится между самой короткой (осевая мода) и самой длинной траекторией (критическая мода). Все лучи проходят примерно одинаковое расстояние, что существенно уменьшает многомодовое уширение импульса. Перемешивание мод не является преобладающим фактором, так что модовые искажения остаются главной причиной уширения импульсов в ступенчатом оптовом волокне. Хотя перемешивание мод и уменьшает значение уширения импульса, оно является нежелательным явлением. Отклонения могут направлять некоторые лучи по траекториям, что углом, меньшим критического угла. Энергия этих лучей будет потеряна, что приводит к росту затухания в волокне.

Вторая причина снижения значения уширения импульсов – повышенное затухание мод высших порядков. Эти моды распространяются по волокну в течение большего промежутка времени, чем моды низших порядков, вследствие их зигзагообразных траекторий, и более глубокого проникновения в оболочку. Следовательно, они испытывают большее затухание. Имея меньшие амплитуды, они дают меньший вклад в мощность выходного импульса, чем моды нижних порядков. Взяв производную от выражения (2) видим, что все моды переносят одинаковую мощность. Если модами высшего порядка пренебречь вследствие их уменьшенного вклада, то уширение импульса будет меньше, чем значение, предсказанное уравнением (2). Избирательное поглощение, вызывая снижение уширения импульса, увеличивает результирующее затухание сигнала аналогично тому, как это происходит при перемешивании мод.

Следует подчеркнуть, что модовые искажения не зависят от длины волны или ширины спектра источника излучения. В этом их отличие от материальной и волноводной дисперсии, которые зависят и от длины волны и ширины спектра источника излучения.

Общее (результирующее) уширение импульса $\Delta\tau$ вследствие модовых искажений и двух составляющих дисперсии

$$(\Delta\tau)^2 = (\Delta\tau)_{\text{мод}}^2 + (\Delta\tau)_{\text{дис}}^2, \quad (3)$$

где $(\Delta\tau)_{\text{мод}}$ – многомодовое уширение импульса и $(\Delta\tau)_{\text{дис}}$ – уширение импульса вследствие дисперсии. Это уравнение является наиболее общим выражением совместного учета и модового и дисперсионного уширения импульсов. Модовые искажения и дисперсия не складываются алгебраически, поскольку они вызваны независимыми причинами. Обычно, дисперсия вносит только малую долю в общее уширение многомодовых ступенчатых оптовых волокон. Волноводное уширение в волокне:

$$\Delta(\tau/L) = -\frac{\lambda}{c} n_{\text{эфф}}'' \Delta\lambda = -M_g \Delta\lambda, \quad (4)$$

где M_g – волноводная дисперсия и $\Delta\lambda$ – ширина спектра источника. Типичные значения M_g приведены на (рис. 2). Таким образом, $\Delta(\tau/L)_{\text{дис}} = -(M + M_g)\Delta\lambda$. Видно, что в интервале длин волны 800...900 нм волноводная дисперсия имеет намного меньшую величину, чем

материальная дисперсия. Например, на волне 0,82 мкм материальная дисперсия равна 110 пс/(нм·км), а волноводная дисперсия – приблизительно 2 пс/(нм·км). Уширением из-за волноводной дисперсии можно без опаски пренебречь для всех систем, кроме работающих в области 1200...1600 нм.

Уширение импульса вследствие материальной и волноводной дисперсии пропорционально ширине спектра источника излучения. Лазерный диод с узкой линией генерации минимизирует это уширение. Однако модовое искажение обычно доминирует в многомодовом волокне со ступенчатым показателем преломления, что делает лазерный диод в значительной степени малоэффективным для снижения уширения импульсов. По этой причине для систем, использующих многомодовые ступенчатые оптоволоконные волокна, обычно выбираются менее дорогие источники типа светоизлучающего диода.

Математическая модель опто-оптического преобразователя (ООП) будем характеризовать коэффициентом передачи мощности (рис. 3)

$$K_o = P_{o\text{ вых}}(\text{Вт})/P_{o\text{ вх}}(\text{Вт}), k_o(\text{дБ}) = p_{o\text{ вых}}(\text{дБм}) - p_{o\text{ вх}}(\text{дБм}),$$

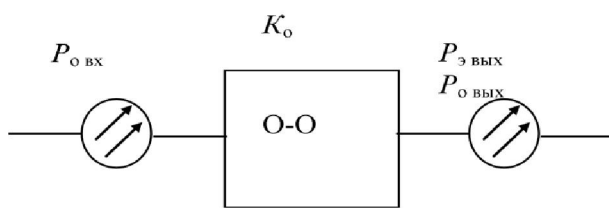


Рис. 3 Функциональная схема опто-оптического преобразователя.

где $P_{o\text{ вх}}$ и $P_{o\text{ вых}}$ – средние значения мощности оптического излучения на входе и выходе соответственно. Для активного ООП, например, оптического усилителя $K_o > 1$ ($k_o > 0$ дБ), в то время как для пассивного (оптическое волокно, соединитель, аттенюатор, вентиль и др.) $K_o < 1$ ($k_o < 0$ дБ).

Таблица 1

Коэффициент затухания (дБ/км) кварцевых ОВ

Тип ОВ	Длина волны оптического излучения, нм			
	850	1300	1380 (пик ОН)	1550
ОМ 50/125	1,80	0,35	0,55	0,20
ММ 8,2/125	2,80	0,80	1,00	0,60

В табл.1 приведены значения коэффициента затухания α кварцевого ОВ (основной тип ООП) на различных длинах волн. Например, для ОВ длиной l (км) находим $k_o(\text{дБ}) = \alpha(\text{дБ/км})l(\text{км})$.

Выводы

Оптические волокна характеризуются затуханием, уширением импульса и числовой апертурой. В системе ограниченной мощностью значение затухания в волокне более критично, чем значение уширения импульсов. От величины NA зависят потери при вводе мощности от источника излучения в волокно, так что этот параметр важен в системе, ограниченной мощностью. Для длинных высокоскоростных линий уширение импульса может представлять главный интерес, а потери – иметь второстепенное значение.

Список литературных источников

1. Гальярди Р.М., Карп Ш. Оптическая связь: Пер. с англ. /Под ред. А.Г. Шереметьева. М.: Связь, 1978. - 424 с.
2. Справочник по волоконно-оптическим линиям связи / Л.М. Андрушко, В.А. Вознесенский, В.Б. Каток и др.; Под ред. С.В. Свечникова и Л. М. Андрушко. Киев : Техника, 1988. - 239 с.
3. Иванов В.Т. Волоконно-оптические технологии на пути реализации полностью оптических систем связи // ИнформКурьер-Связь. 2000. - № 11.- С. 76-77.
4. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно оптические сети. - М.: Изд-во ЭКО-ТРЕНДЗ, 2000. - 267 с.
5. Гауэр Дж. Оптические системы связи // М.: Радио и связь. – 1989. – 504 с.
6. Волоконно-оптическая техника: история, достижения, перспективы / Сборник статей под ред. Дмитриева С.А., Слепова Н.Н. - М.: Издательство «Сонест», 2000. - 376 с.
7. Корнейчук В.И., Макаров Т.В., Панфилов И.П. Проектирование волоконно-оптических систем передачи // Учебное пособие. – Одесса: ОЭИС, 1991. – 118с.