

МРНТИ 49.29.17

<https://doi.org/10.48081/AKQZ7832>

***А. С. Звонцов¹, А. П. Кислов², Л. Н. Кириченко³,
У. К. Жалмагамбетова⁴, О. А. Андреева⁵**

^{1,2,4}Торайғыров университет, Республика Қазақстан, г. Павлодар;

³Қазақстанның агротехникалық зерттеушілік университетінің атымен

С. Сейфуллина, Астана қ.

е-mail: trgal@mail.ru

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ОСНОВ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ОПТИЧЕСКИХ СВЕТОВОДАХ

В статье рассмотрены физические основы волновой и геометрической оптики, используемые в метрологическом обеспечении оптических световодов и оптической связи.

Показаны зависимости одного из главного параметра системы передачи информации – скорости – от физического строения световолокна.

Виды неоднородного показателя преломления оптического тракта групповой световой сигнал движется с различной скоростью, что приводит к увеличению длительности импульса, лежащего в основе изучения дисперсионных явлений.

Определено, что световой импульс состоит из ряда лучей, которые распространяются не только вдоль оси волокна, но и под некоторым углом наклоном.

Представлены полные расчеты, показывающие искажение и затухание оптических сигналов
Определены принципы действия оптического рефлектометра и дан анализ мощности оптического излучения, показывающий потери оптического соединения на границе раздела различных видов проводимостей оптического волокна.

Проанализированы импульсы прохождения и отражения сигнала при распространении в прямом и обратном направлениях.

Даны нерасчетные характеристики оптической системы принципа демультиплексирования светового луча, и выявляются в результате данного процесса луч проходящий и луч отраженный.

152

Имеющиеся показатели показывают различие в характеристике отражения на границе раздела с плоскими и закругленными краями контактных световодов.

Ключевые слова: явление демультиплексирования, коэффициент широконуглового рассеяния, световая апертура, показатель преломления, оптический волновод, монохромное излучение, световой импульс.

Введение

Предельный объем информации, которую можно передать по волокну определенной длины, определяется его полосой пропускания. Для оценки данного параметра оценивают обратную величину – дисперсию, связанную с временными задержками сигнала на входе и выходе волновода.

В дальнейшем будет показано, что с увеличением эффективной длины многоволнового тракта хроматическая дисперсия на участке будет возрастать, а полоса пропускания – уменьшаться.

Увеличение величины хроматической дисперсии говорит о задержке между передающими и принимаемыми импульсами. Учитывая, что она носит нежелательный характер, в технике передачи предусматривают методы уменьшения ее влияния через материальную и волноводную дисперсию.

В первом случае необходимо использовать волокна с градиентным показателем преломления.

Во втором случае будет рассмотрена апертура светового луча, явление демультиплексирования способом уменьшения отраженного сигнала для уменьшения интерференции на лазерный источник излучения.

Материалы и методы

Метрология обнаружения разъемных механических соединителей и оценка потерь на границе раздела двух сред.

Одно из главных свойств геометрической оптики, нашедшей применение в оптических волноводах – отражение света и вследствие этого, ввод термина «коэффициент отражения» по отношению к проходящему лучу от участков волокна вблизи воздушного зазора на границе перехода.

При условии входа светового импульса под определенным углом в оптически более плотную среду (мы рассматриваем полимерное стекло) из оптически менее плотной (воздушная среда) его направление распространения по отношению к оси волновода изменяется ввиду наличия кварцевой сердцевинки с показателем преломления и ее окружающей оболочкой с коэффициентом преломления.

На этом процессе основано явление полного внутреннего отражения

153

$$\sin \alpha_0 = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

Для волоконно-оптических линий связи критический угол $\alpha_0 \approx 42^\circ$.

Выделим 3 возможных хода геометрии светового луча.

Если угол между лучом и нормалью является критическим, то вводимый луч будет распространяться вдоль границы «сердцевина-оболочка».

При условии $\alpha_0 > 42^\circ$ луч будет проходить в оболочке волновода.

Соблюдая параметр $\alpha_0 < 42^\circ$ свет будет проходить вдоль сердцевины путем многократного отражения.

Данное отношение необходимо при проектировании ввода оптического лазерного диода в канал передачи данных.

В системах лазерной связи учитывается данный угол α_0 , близкий к критическому, который при проходе через торцы волноводов будет неоднократно отражаться, и ввиду дисперсии волнового импульса, с разной групповой скоростью распространения моды.

Если граница раздела двух сред немного меньше рабочей длины волны $\Delta \ll \lambda$ мощность прохождения имеет вид

$$P_{\text{пр}} = \frac{4 \cdot n_1^2 \cdot n^2}{4 \cdot n_1^2 \cdot n^2 + (n_1^2 - n^2)^2 \cdot \sin^2(2\pi n \Delta / \lambda)} \quad (2)$$

где n_1 – показатель преломления используемого оптоволокна;

n – показатель преломления воздуха;

Δ – граница раздела двух сред, нм;

λ – граница раздела двух сред, нм;

$$P_{\text{отр}} = \frac{(n_1^2 - n^2)^2 \cdot \sin^2(2\pi n \Delta / \lambda)}{4 \cdot n_1^2 \cdot n^2 + (n_1^2 - n^2)^2 \cdot \sin^2(2\pi n \Delta / \lambda)} \quad (3)$$

Коэффициент отражения может быть рассчитан соответственно как

Исходя из выражений, требуемая длина волны для коэффициента прохождения может быть найдена как

Для коэффициента отражения соответственно

$$\lambda = \frac{2\pi n \Delta}{\sin^{-1} \sqrt{\frac{4 \cdot n_1^2 \cdot n^2 - P_{\text{пр}} \cdot 4 \cdot n_1^2 \cdot n^2}{P_{\text{пр}} (n_1^2 - n^2)^2}}} \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{2\pi n \Delta}{\sin^{-1} \sqrt{\frac{P_{\text{отр}} \cdot 4 \cdot n_1^2 \cdot n^2}{(1 - P_{\text{отр}}) \cdot (n_1^2 - n^2)^2}}}$$

При переходе стекло-воздух из показателя преломления $n_1 = 1.5$ в $n = 1$ при расстоянии границы раздела двух сред Δ в 800 нм и использовании рабочей длины волны лазерного излучения λ в 1300 нм получим значения показателя по формуле (1) коэффициента прохождения $P_{\text{пр}} = 0.92$ и коэффициента отражения 0,079 соответственно.

В таблице 1 даны практические значения физических показателей используемых конструкций соединения.

Таблица 1 – Параметры физического тракта и оптимальная длина волны при наличии физического соединителя

Границы раздела двух сред Δ , нм	Рабочая длина волны λ , нм	Коэффициент прохождения
800	1300	0,92
78	1300	0,97
50	1300	0,9901
50	1550	0,99301

Анализируя формулы (2) и (3) можно сделать вывод что расстояние между волноводами должно быть намного меньше длины источника излучения для достижения практически безвозвратного хода луча

Например, если 100 мкВт энергии достигает конца волокна, то около 8 мкВт отражается назад к источнику, что соответствует плоским торцам на границах раздела

Потери световой энергии, распространяющийся в прямом направлении могут быть определены логарифмическим соотношением

$$P_{\text{отр}} = -10 \lg P_{\text{пр}} \quad (5)$$

Данная величина по умолчанию равна 0,35 дБ, что соответствует рекомендациям стандарта G.651 и потерям в большинстве современных конструкций соединителей и соответствует коэффициенту прохождения $R_{np}=0,92$ согласно (2) и при увеличении проходящей мощности потери для одного разъема уменьшаются.

В таблице 2 показаны потери в разъемных соединителях для муфтового соединения.

Таблица 2 – Потери в разъемных соединителях для муфтового соединения

Уровень качества	Потери для одного разъема, $l, дБ$
1	0,75
2	0,4
3	0,2
4	0,1

Обратные отраженные потери, распространяющиеся в противоположном направлении к основному, определяют как

$$P_{np} = 10 \lg R_{отр} \quad (6)$$

Для значения в 8 мВт значение P_{np} составляет -11 дБ, показывающая, что отраженная мощность меньше падающей на 11 дБ.

Результаты и обсуждение

Обнаружение разъемных соединителей, равно как и измерение оптических возвратных потерь и обратного отражения на участке регенерации возможно с помощью рефлектометра.

Еще одним важнейшим оптическим параметром является величина обратного отражения $RL_{ог}$, измеряемая в децибеллах с помощью оптического рефлектометра, которая особенно велика в случае, если торцы волокон в разъемном соединении разделены воздушным зазором.

На сетях связи общего пользования выделяют следующие уровни качества обратного отражения в оптических соединителях, показатели которых приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Коэффициенты обратного отражения разъемных оптических соединителей до уровня суперполировки FC, SC и LC типов

Уровень качества	$RL_{ог}, дБ$
1	-20
2	-30

3	-32
4	-35

В логарифмическом масштабе обратные потери, оценивающие интенсивность отраженного луча, идущего навстречу основному определяются по соответствующему отношению $RL_{ог}=10 \lg R_{отр}$. Учитывая показатели формулы (5), в нашем случае $RL_{ог}=10 \lg 0,079$

Используя уровень качества сигнала 2, получим $10 \lg R_{отр}=-30$, что соответствует коэффициенту отражения 0,001 или 0,1% соответственно.

Таким образом полировка торцов на границах и стыках стекловолокна позволяет значительно снизить (менее 0,1 %) коэффициент отражения мощности поступаемого информационного сигнала.

Для различных комплектаций муфтовых соединителей нормированы допуски отражения сигнала, представленные в таблице 4.

Таблица 4 – Пределные величины оптических возвратных потерь и предельные величины обратного отражения

Количество кассет N, ед.	Уровень качества сигнала	Пределные оптические возвратные потери $RL_{ог}$, дБ	Пределные величины обратного отражения $RL_{ог}$, дБ
2	1	13,99	17,99
	2	23,99	27,99
	3	25,99	29,99
	4	28,99	32,99
3	1	12,23	16,23
	2	22,23	26,23
	3	24,23	28,23
	4	27,23	31,23
4	1	10,98	14,98
	2	20,98	24,98
	3	22,98	26,98
	4	25,98	29,98
5	1	10,01	14,01
	2	20,01	24,01
	3	22,01	26,01
	4	25,01	29,01
6	1	9,22	13,22
	2	19,22	23,22
	3	21,22	25,22
	4	24,22	28,22

Ввиду того, что электромагнитные волны инфракрасного диапазона способны распространяться в диэлектрической среде, в технике передачи данных широко применяются волоконно-оптические линии связи, где источником распространения электромагнитных волн служат стекловолокно, а источником оптического излучения – лазерные диоды.

Учитывая, что частота световой волны находится как

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (7)$$

Соответственно изменение частоты вызывает изменение длины волны

$$df = -\frac{c}{\lambda^2} d\lambda \quad (8)$$

Учитывая, что в реальной технике передачи информации излучение лазера не является монохроматическим, а передается волновым пакетом – распространением отдельных волн с различными скоростями. Данную скорость называют групповой скоростью.

Существует и определенный групповой показатель преломления физической среды. Для полимерного стекла

$$n_{гр} = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \quad (9)$$

Показатель преломления зависит от длины волны света. С помощью модуляции данного волнового пакета возможно передать информацию.

Учитывая нисходящий наклон коэффициента $\frac{dn}{d\lambda}$, делаем вывод что групповой показатель преломления для любых применяемых волн больше отдельно взятых показателей сердцевины и оболочки.

Зависимость задержки импульсов может быть представлена в виде коэффициента хроматической дисперсии, пс/км*нм.

$$D_\lambda = \frac{1}{L} \frac{d\tau(\lambda)}{d\lambda} \quad (10)$$

где

L – длина линии, км;

λ – длина волны, нм;

$\tau(\lambda)$ – время длительности хроматической дисперсии, пс

Величина хроматической дисперсии вычисляется исходя из формулы Селмейера, пс/км

$$D_\lambda = \left| \frac{S_0}{4} \left(\lambda - \frac{\lambda_0^2}{\lambda} \right) \right| \quad (11)$$

где λ_0 – длина волны нулевой дисперсии, равная 1300 нм для кабеля категории OM4 и 1550 нм для категории OM3 соответственно.

S_0 – крутизна характеристики дисперсии на длине волны λ_0 , равная $10^{-5} \frac{пс}{нм}$

м • км

λ – фактическая длина волны в технике параллельной передачи, равная 850 нм.

Определение параметров предельной эффективной длины многомодового тракта в модульно-каскадном решении имеет следующий вид

$$L = 1 \cdot A + L + 2.24 \cdot \int_{f_0}^f -0.6 + f_s \quad (12)$$

В таблице 5 представлены различные значения дисперсии для предельных длин тракта передачи с учетом характеристик волокон SSF без дополнительных мероприятий по компенсации дисперсии

Таблица 5– Результаты оценки дисперсии и максимальная протяженность трактов

Скорость передачи данных, Гб/с	1	10	40	100	500	1000
Энергетический потенциал оптического сетевого Интерфейса E, дБ				5,85		
Недисперсионный штраф по мощности $\Gamma_{дБ}$				0,98		
Допустимые потери для оптоволокна L, дБ				1,039		
Ожидаемая величина затухания A, дБ/км				3,4		
Эффективная длина многомодового тракта L, м	905	243	71	29,7	5,96	2,98
Полоса пропускания, МГц	2358	8773	30157	72900	358043	714440

Хроматическая дисперсия на участке, псек/км	72	19	56	23	47	24
---	----	----	----	----	----	----

Результирующая дисперсия тракта может быть найдена как

$$\tau_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\tau_i)^2} \quad (13)$$

В нашем случае

$$\tau_{\Sigma} = \sqrt{72^2 + 19^2 + 56^2 + 23^2 + 47^2 + 24^2} = 74 \text{ псек/км}$$

На практике часто используют другой статистический параметр – среднеквадратическое отклонение (RMS) дисперсии

$$\tau_{\delta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tau_i - \bar{\tau})^2}{n}} \quad (14)$$

где τ_i – среднее арифметическое ряда данных хроматической дисперсии в приведенном примере

$$\tau_{\delta} = 25 \text{ псек/км}$$

Выводы

В больших трактах передачи информации необходимо решать проблемы, связанные с затуханием и рассеянием импульса.

Затухание волны в оптических волокнах вызывается расходом энергии на возбуждение колебаний электронов. В конечном счете при прохождении через оптоволокно происходит рассеяние электромагнитных волн, которое может быть значительным из-за отсутствия закругленных краев торцов световодов, в том числе в противоложном направлении идущего луча.

Ввиду анизотропности строения среды передачи данных многомодовые и одномодовые световоды различаются в зависимости от профиля показателя преломления от сердцевинны к оболочке.

Оптическая оболочка с большим значением показателя преломления сердцевинны и большим значением допустимого угла ввода способна принять большой импульс электромагнитной волны.

Однако ввиду неспособности лазерного источника излучения генерировать когерентный монохромный импульс имеет место наблюдаемая в одномодовых и многомодовых волокнах явление хроматической дисперсии.

Представлены полные расчеты, показывающие искажение и затухание оптических сигналов ввиду зависимости показателя преломления от длины используемого лазерного излучения.

Полученные результаты расчетов оптических коэффициентов лучей совпадают с применяемыми в настоящее время разъемными оптическими соединителями с соответствующим уровнем полировки торцевых поверхностей волокон в оптических разъемах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 **Куриворучко, В. А., Звонцов, А. С.** Управление физическим уровнем инфокоммуникационной сетевой модели ISO OSI [Текст]: научный журнал/М.: Современная гуманитарная академия, 2014. №10. – С. 57–69
- 2 **Звонцов, А. С., Кислов, А. П.** Метрологическое обеспечение пассивных компонентов волоконно-оптических линий связи [Текст]: научный журнал вестник Торайгыров университета, 2021. №3. – С.50-62
- 3 **Olzhas Talipov, Alexandr Kislov, Alexandr Nefissov, Alexey Zvonitsov, Laila Kirichenko,** Metrological Support of Passive Components of Fiber-Optical Communication Lines for Determining the Parameters of the Effective Length of a Multi-Mode Tract Taking Into Account Dispersional Characteristics. //2022 Smart Information Systems and Technologies (SIST) 28-30 April, 2022, Nur-Sultan, Kazakhstan p.482-486
- 4 **Артюшенко, В. М.** Проектирование и расчет мультисервисных кабельных систем : учебное пособие / В.М. Артюшенко, А.Б. Семенов, Т.С. Аббасова; под ред. А.Б. Семенова. – Москва : ИНФРА-М, 2020. – 174 с. – (Высшее образование: Бакалавриат).
- 5 **Портнов, Э. Л.** Принципы построения первичных сетей и оптические кабельные линии связи. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009.
- 6 **Семенов, А. Б.** Введение в структурированные кабельные системы [Текст]: учеб. пособие / А.Б. Семенов, В.М. Артюшенко, Т.С. Аббасова; под ред. А.Б. Семенова. – М.: Научный консультант, 2018. – 206 с.
- 7 **Семенов, А. Б.** Волоконно-оптические подсистемы современных СКС [Текст] / А.Б. Семенов. – М.: ДМК Пресс; Компания «АйТи», 2015. – 632с.
- 8 **Фриманц, Р.** Волоконно-оптические системы связи. – М.: ЗАО «РИЦ «Техносфера», 2003
- 9 **Хромой, Б. П.** Метрология и измерения в телекоммуникационных системах. – М.: ИРИАС. 2008. – 560 с.

10 **Мандель, А. Е.** Метрология в оптических телекоммуникационных системах : учебное пособие [Текст] А. Е. Мандель. – Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2014. – 139 с. – Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/72128.html>.

11 **Фокин, В. Г.** Волоконно-оптические системы передачи: практикум / В. Г. Фокин. – Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2011. – 58 с. – Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [сайт]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/35603.html>

12 **Бородихин, М. Г.** Волоконно-оптические системы передачи: практикум [Текст] М. Г. Бородихин, К. Е. Заславский; под редакцией К. Е. Заславский. – Новосибирск : Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2010. – 139 с. – // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/55443.html>

REFERENCES

- 1 **Кривогушечко, V. A., Zvonitsov, A. S.** Управление физическим уровнем инфокоммуникационной сетевой модели ISO OSI. [Management of info-communication network ISO OSI model's physical level] [Text]. // научный журнал Moscow : Современная гуманитарная академия, 2014. – № 10. – P. 57–69
- 2 **Zvonitsov, A. S., Kislou, A. P.** [Metrologicheskoe obespechenie passivnykh komponentov volokonno-opticheskikh liniy svyazi] Metrological support of passive components of fiber-optical communication lines [Text]: // Vestnik Torajyugov universiteta, – 2021. – №3. – P. 50–62.
- 3 **Olzhas Talipov, Alexandr Kislou, Alexandr Nefissou, Alexey Zvonitsov, Lalita Kirichenko,** Metrological Support of Passive Components of Fiber-Optical Communication Lines for Determining the Parameters of the Effective Length of a Multi-Mode Tract Taking Into Account Dispersional Characteristics. // 2022 Smart Information Systems and Technologies (SIST) 28–30 April, 2022. Nur-Sultan, Kazakhstan P. 482–486.
- 4 **Artuyshenko, V. M.** Проектирование и расчет мультисервисных кабельных систем : учебное пособие [Design and calculation of multiservice cable systems] – [Text]. – V. M. Artuyshenko, Ed by A. B. Semenov, T. S. Abbasova; A. B. Semanova. – Moscow : INFRA-M, 2020. – P.174. – (Vysshее obrazovanie : Bakalavriat).
- 5 **Portnov, E. L.** Principy postroeniya pervichnykh setey i opticheskie kabel'nye liniy svyazi. [Principles of construction of primary networks and optical cable communication lines] [Text]. – Moscow : Goryachaya liniya – Telekom, 2009.

6 **Semenov, A. B.** Введение в проектирование кабельных систем – [Introduction to structured cabling system] [Text]. – : учеб. пособие / А. В. Семенов, V. M. Artuyshenko, T. S. Abbasova; Ed by A. B. Semenov. – Moscow : Nauchnyy konsul'tant, 2018. – 206 p.

7 **Semenov, A. B.** Волоконно-оптические подсистемы современных SKS [Fiber-optic subsystems of modern SKS] – [Text]. – / А. В. Семенов. – Moscow : ДМК Пресс; Компания «АДТ», 2015. – 632 p.

8 **Friman, R.** Волоконно-оптические системы связи. [Fiber-optic communication systems] – [Text]. – Moscow : ЗАО «РИС «Техностаер», 2015.

9 **Нромой, В. Р.** Метрология и измерения в телекоммуникационных системах. [Metrology and measurements in telecommunication systems]. – Moscow : IRIAS, 2008. – 560 p.

10 **Mandel, A. E.** Метрология в оптических телекоммуникационных системах : учебное пособие [Metrology in optical telecommunication systems: a tutorial] [Text]. / А. Е. Мандель. – Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2014. – 139 p. – // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS : [Electronic resource]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/72128.html>

11 **Фокин, В. Г.** Волоконно-оптические системы передачи : практикум [Fiber optic transmission systems: workshop] [Text]. / V. G. Fokin. – Novosibirsk : Sibirskiy gosudarstvennyy universitet telekommunikatsiy i informatiki, 2011. – 58 p. – [Текст: электронный] // Электронно-библиотечная система IPR BOOKS: [Electronic resource]. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/35603.html>

12 **Borodihin, M. G.** Волоконно-оптические системы передачи : практикум [Fiber optic transmission systems: workshop] [Text]. / M. G. Borodihin, K. E. Zaslavskiy; pod redakciey K. E. Zaslavskiy. – Novosibirsk : Sibirskiy gosudarstvennyy universitet telekommunikatsiy i informatiki, 2010. – 139 p. – [Text: electronic] // Electronic library system IPR BOOKS: [website]. – [Electronic resource]. URL: <https://www.iprbookshop.ru/55443.html>

Принято к изданию 28.11.23.

- А. С. Звонцов¹, А. П. Кислов², Т. Н. Кириченко³, У. К. Жалмагамбетова⁴
О. А. Андреева⁵*
- ^{1,2,4}Торайғыров университет, Казакстан Республикасы, Павлодар қ.
- ³С. Сейфуллин ағылдағы Казак агротехникалық зерттеу университеті, Казакстан Республикасы, Астана қ.
- Басып шығаруға 28.11.23 қабылданды.