

**\*А. С. Звонцов<sup>1</sup>, А. П. Кислов<sup>2</sup>, Л. Н. Кириченко<sup>3</sup>,  
У. К. Жалмагамбетова<sup>4</sup>, О. А. Андреева<sup>5</sup>**

<sup>1,2,4</sup>Торайғыров университет, Республика Қазақстан, г. Павлодар;

<sup>3</sup>Қазақстанның агротехникалық ысследователік университетінің атымен

С. Сейфуллина, Астана қ.

е-mail: [trgal@mail.ru](mailto: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 действия преломляемости светового луча, и выявляются в результате данного процесса луч проходящий и луч отраженный.*

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

*Ключевые слова: явление двулучепреломляемости, коэффициент широконеплодородности, 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 многократного 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 двулучепреломляемости способы 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 сердцевины с показателем преломления и ее окружающей оболочкой с коэффициентом преломления.

На этом процессе основано явление полного внутреннего отражения

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

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  $\alpha_0$ , 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 оптоволоконка;

$n$  – показатель преломления воздуха;

$\Delta$  – граница раздела двух сред, нм;

$\lambda$  – 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  $\Delta$  в 800 нм и использовании рабочей длины волны лазерного излучения  $\lambda$  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 $\Delta$ , нм	Рабочая длина волны $\lambda$ , 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

$$P_{np} = 10 \lg P_{отр} \quad (6)$$

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 определают 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 поступающего 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 отдельной взятой показателей сердцевинны и оболочечки.

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;

$\lambda$  – 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  $\lambda_0$  – 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  $\lambda_0$ , равная  $10^{-5} \frac{пс}{нм}$

м • км

$\lambda$  – фактическая длина волны в технике параллельной передачи, равная 850 нм.

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

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

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 $r_{дБ}$				0,98		
Допустимые потери для оптоволокну 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  $\tau_i$  – 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 оптоволоконно 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., Kisllov, 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 Kisllov, Alexandr Nefissov, 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 setej 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 : Nauchnyj konsul'tant, 2018. – 206 p.

7 **Semenov, A. B.** Волоконно-оптические подсистемы современных SKS [Fiber-optic subsystems of modern SCS] – [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 : Sibirskij gosudarstvennyj universitet telekommunikacij 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. Zaslavskij; pod redakciej K. E. Zaslavskij. – Novosibirsk : Sibirskij gosudarstvennyj universitet telekommunikacij 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. Звонитсов<sup>1</sup>, А. П. Кислов<sup>2</sup>, Т. Н. Кириченко<sup>3</sup>, У. К. Жалмагамбетова<sup>4</sup>  
 О. А. Андреева<sup>5</sup>
- <sup>1,2,4</sup>Торайғыров университет, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.  
<sup>3</sup>С. Сейфуллин ағылдағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Астана қ.  
 Басып шығаруға 28.11.23 қабылданды.