

## ЗАДАЧА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ МАЛЫЕ ИСКАЖЕНИЯ В РАЗВЕТВЛЁННОЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СЕТИ

А.Х. Султанов<sup>1</sup>, Р.Р. Гайфуллин<sup>1</sup>, И.Л. Виноградова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия

### Аннотация

Показана необходимость учёта отражённого сигнала в волоконно-оптической системе связи, использующей двустороннюю передачу на единственной длине волны. Методом дополнительного кодирования сетевых узлов предложено идентифицировать состояние «loop», отличая его от результата отражений, возникающих вследствие не идеальности волоконно-оптического тракта. Для успешной реализации данной технической идеи необходимо обеспечить неизменность передаваемого информационного параметра, заключающегося в форме огибающей мощности импульса. Проведено математическое моделирование динамики формы оптического импульса в случае действия многолучевой интерференции, дисперсии, нелинейного изменения показателя преломления и затухания. Установлено, что существенными факторами искажений являются нелинейные эффекты и дисперсия, а многолучевая интерференция проявляется в виде размытия формы действием высших порядков. В то же время действие первого интерференционного порядка может быть скомпенсировано подбором огибающей мощности.

### Введение

Предметом рассмотрения является моделирование динамики формы оптического импульса (с обоснованием оптимального вида формы), распространяющегося по волоконно-оптической линии передачи, содержащей компоненты управления и разветвления. В отличие от уже ставшей классической постановки задачи для солитонов, в данном случае к параметрам импульса предъявляются несколько иные требования, равно как и к назначению (целям использования) импульса. Предполагается, что посредством использования различных форм огибающей мощности оптического импульса можно задавать дополнительную адресацию узлов волоконно-оптической сети (например, сети типа PON, Ethernet) [1]. Такая дополнительная адресация по отношению к стандартным методам цифрового кодирования информационных посылок, может оказаться полезной для повышения работоспособности сети, например, для компенсации состояния «loop», возникающего из-за неизбежных отражений сигнала в оптической линии. Прокомментировать последнее можно следующим образом. Из-за значительной разветвлённости волоконно-оптической сети (в частности, кабельного телевидения, интеллектуальной цифровой сети и т.п.), начиная приблизительно с 20 подключённых сетевых узлов либо оптических компонентов управления в оптоволоконном линейном тракте, появляется значительный уровень отражённого оптического сигнала. Из-за того, что сеть в большинстве случаев настраивается на работу с обратным каналом, т.е. предполагается приём оптического сигнала на той же рабочей длине волны, практически на всём сетевом оборудовании происходит срабатывание сигнализации отключения канала – сигнализации «loop». Последнее имеет место, когда выходной оптический сигнал попадает на вход этого же устройства, так называемое состояние петли ли-

нии или «loop». Использовать для обратного канала другую длину волны (в режиме WDM) в ряде случаев не представляется возможным, т.к. на ней может передаваться какой-либо другой сигнал, например, аналоговый телевизионный сигнал. Ввод в эксплуатацию оборудования DWDM может оказаться неприемлемым решением из-за неоправданных финансовых затрат, в том числе и из-за несовместимости с используемым оптоволоконным трактом.

Следовательно, необходимо решить задачу распознавания адреса узла, от которого пришёл данный сигнал, на стадии, предшествующей регенерации цифрового сигнала, т.е. буквально сразу после фотодиода и первого усилительного каскада. Следует отметить, что цифровая адресация узлов, присутствующая в каждой цифровой посылке согласно сетевому стандарту, также имеет место. Но из-за того, что данная адресация анализируется после регенерации цифрового сигнала, при помощи неё не удаётся как-либо скомпенсировать состояние «loop».

С технической точки зрения решение может быть получено путём дополнения каждого сетевого устройства, которое должно работать в условиях двусторонней передачи, блоком рефлектометра, генерирующего импульс заданной формы (характерной именно этому узлу), а соединение, обеспечивающее сигнализацию «loop», необходимо разомкнуть, [1], добавив в известную схему блок анализа отражённого импульса. Таким образом, на сетевом узле с номером  $i$  устанавливается (выбирается, задаётся в зависимости от номера узла) форма специального импульса, представляющего собой аналоговый сигнал ввиду значимости его формы. Этот импульс добавляется в один или более тактовый интервал избыточных полей (например, поле примечания) сформированной цифровой посылки. Вследствие того, что на приёме такой импульс (далее – рефлектометрический импульс) будет неоднозначно восприниматься цифровой решающей системой, целесообразно программным путём занулить считанную в

данном поле информацию. На приёме дополнительно к регенератору цифрового сигнала устанавливается специальный блок контроля и оценки формы рефлектометрического импульса. Контроллер приёма воспринимает данный импульс по истечении времени  $\tau$ , после начала принимаемой цифровой посылки, определяемого по количеству тактовых интервалов до заданного момента, начиная с которого должен передаваться ожидаемый импульс. Оценка формы аналогового импульса производится по настроенной для каждого сетевого узла глаз-диаграмме (ГД) [2]. В случае, если ГД-проверка показывает, что исследуемый импульс не принадлежит данному узлу («чужой» импульс), то цифровую посылку следует считать, т.к. она направлена от какого-либо из соседних сетевых узлов. Очевидно, что такой случай заведомо не является состоянием «loop». Если пришедший импульс «свой», т.е. был генерирован данным сетевым оборудованием, то посылку считать не имеет смысла (она была отправлена из этого же узла), но следует выяснить, имеет ли место состояние «loop». Для чего даётся команда блоку-рефлектометру для построения рефлектограммы данного импульса. В случае, если рефлектограмма содержит единственный характерный пик (всплеск), то этот случай либо соответствует состоянию «loop» (причём по рефлектограмме удаётся достаточно точно выяснить, где именно закорочена линия), либо в оптоволокне имеется единственная характерная точка деградации качества, которую целесообразно устранить путём выезда ремонтной бригады. Иначе, когда рефлектограмма содержит многие пики, расположенные на известных для сегмента расстояниях (места разветвления, сварки), то такая ситуация соответствует нормальному рабочему режиму, как раз такому, который ложным образом отключала сигнализация «loop», и, в данном случае, блок сигнализации будет отключен дополнительно введённой логической схемой. Рефлектометрический импульс должен отвечать следующим требованиям: иметь длительность не более заданного в системе передачи временного интервала (равного длительности свободных полей), и иметь пиковый уровень мощности не более заданного в используемой оптоволоконной линейной системе, например, не превосходить 0 дБм [2].

Необходимость в использовании импульса сложной формы для анализа рефлектограммы объясняется тем, что это даст возможность присваивать каждому сетевому узлу определённый вид огибающей, следовательно, можно говорить об алфавите форм огибающих. Во-первых, это позволяет вести статистику приходящих посылок, отличая собственные, отражённые от направляемых на данный узел, с оценкой отражённого излучения как по схеме сети (для каждого сегмента, получая карту, или точнее, «поверхность» отражений), так и во времени. Во-вторых, появляется возможность ввести параллельный независимый контроль взаимодействия сетевых узлов – не только по адресам цифровой системы, но и по «аналоговому» каналу.

Фактически, рассматривается вид амплитудно-импульсно-модулированного (АИМ) сигнала, когда форма импульса (огибающей несущей) зависит от передаваемой информации. В данной задаче передаваемая информация связана с адресом источника. Считаем, что имеет место когерентный приём, т.е. время начала импульса определено для приёмника (например, на основе анализа стартовых битов цифровой посылки). Существуют известные задачи, когда для передачи информации применяется так называемая символьная модуляция, например, в системах CDMA, GPS, т.е. когда целесообразно использование шумоподобных сигналов<sup>1</sup>, либо сигналов, образованных в соответствии со специальной кодовой комбинацией (например, в соответствии с функциями Уолша), см., например, [3]. Однако в связи со спецификой таких сигналов, а именно, невозможностью использования их для построения рефлектограммы оптоволоконного тракта, известные подходы для решения поставленной задачи не могут быть успешно применены. Иными словами, в рассматриваемом случае необходимо, чтобы сигнал представлялся в виде единственного пика, существенного удалённого (для обеспечения разрешимости) от других передаваемых импульсов. Кроме того, такой пик должен быть достаточно коротким (оптимальным, согласно [4], является 1...10 нс) – для обеспечения требуемого разрешения рефлектограммы для коротких волоконно-оптических сегментов (рассматривается именно такой случай, например, типовой диаметр цифровой интеллектуальной сети [5], в частности, сети Ethernet стандарта 1000Base-LX, составляет не более нескольких километров).

Итак, какова же должна быть форма рассматриваемого импульса? На первый взгляд, исходя из логически вытекающего из поставленной технической задачи требования о минимальном искажении формы при передаче данного импульса, можно прибегнуть к использованию оптических временных солитонов [6, 7 и др.], или, хотя бы, квазисолитонного режима передачи с известными видами огибающей (косекансный, Гауссов, супергауссов импульс и т.п.). Однако анализ задачи показывает, что исследование временных солитонов и получение результатов проводилось при следующих налагаемых условиях:

1. сохранение формы огибающей после солитон-солитонного взаимодействия;
2. минимизация уширения импульса во временной области для протяжённых волоконно-оптических систем для передачи без регенерации.

В данной задаче представленные условия не актуальны, т.к., во-первых, при появлении в линии нескольких посылок одновременно в цифровой систе-

<sup>1</sup> Наиболее простым примером шумоподобного сигнала может служить периодическая кривая (синусоида) с переменной частотой в течение заданного интервала, отведённого, например, для передачи бита информации в данной системе.

ме объявляется коллизия [5], и возобновление передачи начинается в следующий случайный момент времени (свойства сетей со статистическим мультиплексированием). Во-вторых, как упоминалось выше, отсутствует задача длительного распространения импульса по протяжённому тракту. Кроме того, в солитоновых задачах нет обязательной привязки (главной цели) в сохранении формы огибающей для, например, её последующего сравнения с изначальной кривой с выработкой количественной меры несоответствия. Важна неизменная длительность импульса, но как именно при этом будет изменена форма кривой – не имеет существенного значения. Кстати, согласно известным решениям для солитона, при его распространении происходит периодическое изменение формы огибающей, имеет место период солитона, что в рассматриваемом случае является негативным фактором.

Следует дополнительно отметить, что в солитоновых задачах практически не учитывается неизбежно существующая многолучевая интерференция<sup>2</sup>, которая, вообще говоря, приведёт к искажению известных решений вследствие того, что система многолучевых интерферометров, являющаяся моделью разветвлённого линейного тракта [8], обладает свойствами фильтра, который влияет на чирп передаваемого импульса, соответственно меняя его свойства. Кроме того, предполагается, что чирп линейно связан с мощностью импульса (в частности, линейно зависит от тока накачки полупроводникового лазера, излучающего импульс). Однако известны работы, например [9], в которых показано лишь частное применение данного предположения. Очевидно, что в общем случае необходимо учитывать реальные свойства полупроводникового источника.

Таким образом, задача состоит в нахождении вида огибающей мощности оптического импульса при следующих условиях:

1. существование ограничения на пиковую мощность импульса;
2. существование ограничения на длительность импульса;
3. реализуемость чирпа, характеризующего зависимость вида мощность – спектр: где  $\lambda(P)$ , характеризует реальные свойства светоизлучающего устройства;
4. существование таких искажающих факторов, как дисперсия оптоволоконна, в общем случае меняющаяся по длине оптоволоконного тракта (хотя бы вследствие соединения волокон с различными свойствами на строительных длинах), нелинейные свойства оптоволоконна, многолучевая интерференция;

<sup>2</sup> Известные решения, полученные для так называемых брегговских солитонов [7], могут оказаться справедливыми для системы невзаимодействующих и идентичных по параметрам многолучевых интерферометров. Однако реальный оптоволоконный тракт, согласно [8], представим системой взаимодействующих и существенно неидентичных по параметрам многолучевых интерферометров.

5. обеспечения надёжной разделимости (отделимости одной от другой) форм огибающих в зависимости от количества узлов сети.

В последнем пункте разделимость можно считать надёжной, если выполняется принятый в системе связи критерий помехоустойчивого приёма, например, вероятность ошибки считывания оказывается не более задаваемой величины.

#### **Модель эволюции огибающей импульса под действием искажающих факторов оптоволоконного тракта**

Показатель преломления оптоволоконной линии вдоль направления  $z$  может быть представлен следующим образом:

$$n(\omega, z, I) = \bar{n}(\omega) + n^{(2)} \cdot I + n_{\text{нфл}}(z) \quad (1)$$

где  $\bar{n}(\omega)$  – среднее значение показателя преломления оптоволоконной линии, определяющее хроматическую дисперсию сигнала, для  $\omega_0$ , соответствующей рабочей длине волны  $\lambda_0=1550$  нм,  $\bar{n}(\omega_0) \cong 1,48$  для световодов типа SF [4, 10];  $n^{(2)}$  – керровский коэффициент, определяющий нелинейную составляющую коэффициента преломления, обладает слабой зависимостью от частоты излучения, для кварцевых волокон в диапазоне ближнего инфракрасного излучения  $n^{(2)} \approx 2,4 \cdot 10^{-21}$  м<sup>2</sup>/Вт<sup>2</sup>;  $I$  – интенсивность оптического излучения;  $n_{\text{нфл}}(z)$  – функция, определяющая флуктуации коэффициента преломления (вдоль длины оптоволоконна), связанная со стыковкой волокон, обладающих различными параметрами, ответвлениями, подсоединением компонентов управления (включая параметры самих компонентов управления), дефектами и т.п. (рис. 1). Функция  $n_{\text{нфл}}(z)$  может быть получена на основе анализа параметров оптоволоконной линии, либо путём расчёта (пересчёта) с использованием результатов измерений параметров хроматической дисперсии (вдоль линии) первого и второго порядков<sup>3</sup>. Если зависимость  $n_{\text{нфл}}(z)$  имеет выраженные пики (перепады показателя преломления), то появляются отражения, и возникает многолучевая интерференция [8] (или интерференция Фабри-Перо – ИФП). Так как излучение не может быть абсолютно когерентным, степень влияния многолучевой интерференции на сигнал определяется длиной сегмента  $L$ . А именно, изменение набега фаз интерферирующих лучей  $\Delta\delta$  ИФП в случае приращения  $\Delta\lambda$  имеет вид<sup>4</sup>:

<sup>3</sup> Адекватный пересчёт возможен для известного поперечного распределения  $n(x, y)$ , оказывающего влияние на хроматическую дисперсию. В этом случае измерение параметров дисперсии можно произвести, например, с использованием измерительной системы типа FTB-400.

<sup>4</sup> Соотношение справедливо для приближения плоского фронта волны. Следует заметить, что волоконные световоды являются слабо направляющими структурами, вследствие чего для распространяющихся волн можно принять приближение плоского фронта [11].

$$|\Delta\delta| = \frac{4\pi n \bar{L}}{\lambda_0^2} \cdot \Delta\lambda. \quad (2)$$

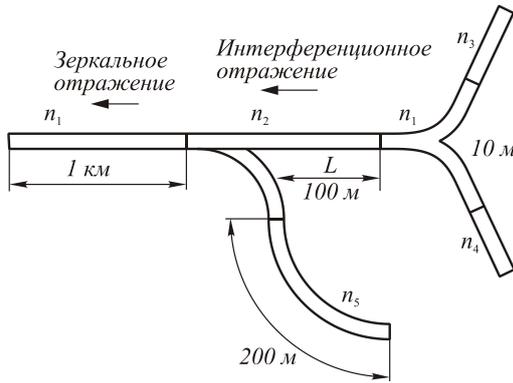


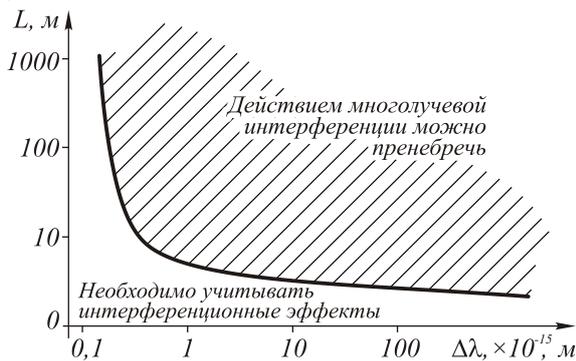
Рис. 1. Схема световодного линейного тракта, собранного из световодов с отличающимися параметрами. В данном случае для одного из сегментов  $n_{\text{фл}}(z)$  может быть представлена:

$$n_{\text{фл}}(z) = \begin{cases} n_1 - \bar{n}, & z \in [0, L_1]; \\ n_2 - \bar{n}, & z \in [L_1, L_2]; \\ n_1 - \bar{n}, & z \in [L_2, L_3]; \\ n_5 - \bar{n}, & z \in [L_3, L_4] \end{cases}$$

Видно, что эффективная величина  $\Delta\lambda$  обратно пропорциональна длине  $L$ . Если для заметного смазывания интерференционной картины необходимо [8]:  $\Delta\delta = \frac{3}{4}\pi \div \pi$ , то получаем соотношение:

$$\Delta\lambda = \frac{C_\delta}{L}, \quad (3)$$

где  $C_\delta$  – константа, зависящая от коэффициента преломления сегмента  $n$ , значения рабочей длины волны  $\lambda_0$  и приращения разности хода лучей  $\Delta\delta$ , но не зависящая от величины отражённого излучения, или от коэффициентов отражения<sup>5</sup> зеркал(а) интерферометра Фабри-Перо. На рис. 2 представлен график функции (3) для типичных значений  $n \approx 1,48$  и  $\lambda_0 \approx 1,55$  мкм.



<sup>5</sup> Отражение происходит из-за перепада коэффициентов отражения. Для скачкообразного изменения  $n$ , представленного на рис. 1, коэффициент отражения от первого стыка будет равен:  $\rho_{12} = |n_1 - n_2| / n_1 + n_2$ .

Рис. 2. График зависимости длины сегмента от ширины линии излучения, представляющий характерный «раздел фаз» между областями, в которых следует или не следует пренебрегать интерференционными эффектами; построен для  $n=1,48$  и  $\lambda_0 \approx 1,55$  мкм

Считая, что нелинейные оптические эффекты оказывают слабый эффект и нелинейную составляющую в (1) можно рассматривать как возмущение, поле в световодной системе (рис. 1) подчиняется уравнению Гельмгольца [7]. Так для Фурье-преобразования напряжённости электрической составляющей поля  $\tilde{E}$  справедливо:

$$\nabla^2 \tilde{E} + n^2(\omega, z) \cdot \frac{\omega^2}{c^2} \cdot \tilde{E} = 0, \quad (4)$$

где  $n(\omega, z)$  соответствует выражению (1),  $c$  – скорость света в вакууме.

Для того, чтобы учесть переотражения в системе, воспользуемся методикой связанных мод [7], которая предполагает, что поле в оптоволоконном тракте может быть представлено в виде прямой и отражённой волн<sup>6</sup> с амплитудами  $\tilde{A}_f$  и  $\tilde{A}_b$ , складывающимися из  $K$  слагаемых:

$$\tilde{E}(\mathbf{r}, \omega) = F(x, y) \cdot \left[ \sum_{k=1}^K \tilde{A}_f^{(k)}(z, \omega) \cdot \exp(j\beta_k z) + \sum_{k=1}^K \tilde{A}_b^{(k)}(z, \omega) \cdot \exp(-j\beta_k z) \right], \quad (5)$$

где  $F(x, y)$ , характеризующее поперечные изменения двух встречных волн, обусловлено модовыми свойствами направляющей структуры;  $K$  – количество «эффективных» ИФП в системе;  $\beta_k$  – волновое число  $k$ -го интерферометра Фабри-Перо,  $\beta_k = \pi/L_k$ ;  $j$  – мнимая единица. Полагая, что  $\tilde{A}_f$  и  $\tilde{A}_b$  медленно меняются в зависимости от  $z$ , в соответствии с методикой [6], получаем для амплитуд связанных мод в частотном представлении:

<sup>6</sup> Вообще говоря, величины  $\tilde{A}_f(z, \omega)$  и  $\tilde{A}_b(z, \omega)$  в (5) могут быть вынесены из-под знаков сумм и представлены в виде усреднённых величин, если считать, что для каждого ИФП они приблизительно равны. Последнее предположение основано на том, что, во-первых, отражения в системе малые, т.к. их наличие снижает работоспособность волоконно-оптической сети, следовательно, является предметом устранения, во-вторых, на результат интерференции в значительной степени влияет фаза сигнала, а не амплитуда.

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^K \frac{\partial \tilde{A}_f^{(k)}}{\partial z} &= \sum_{k=1}^K \left( j(\beta(\omega) - \beta_k + \Delta\beta) \cdot \tilde{A}_f^{(k)} + \right. \\ &+ j\Re \cdot \tilde{A}_b^{(k)} - \frac{\alpha}{2} \cdot \tilde{A}_f^{(k)} \Big) u \\ - \sum_{k=1}^K \frac{\partial \tilde{A}_b^{(k)}}{\partial z} &= \sum_{k=1}^K \left( j(\beta(\omega) - \beta_k + \Delta\beta) \cdot \tilde{A}_b^{(k)} + \right. \\ &+ j\Re \cdot \tilde{A}_f^{(k)} - \frac{\alpha}{2} \cdot \tilde{A}_b^{(k)} \Big), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\beta(\omega)$  – параметр распространения направляемой моды, который связан с коэффициентом преломления следующим образом:  $\beta(\omega) = n(\omega) \cdot (2\pi/\lambda_0)$ ;  $\Delta\beta$  – учитывает действие нелинейных эффектов;  $\Re$  – коэффициент связи, определяющий взаимодействие прямой и отражённой волн;  $\alpha$  – коэффициент линейных потерь в оптоволоконном тракте, в общем случае является функцией  $z$  из-за различия параметров световодов, наличия ответвления и усиления на сегменте. Согласно [7], для случая нелинейности среды керровского типа в пренебрежении нелинейными видами рассеяния и генерации, коэффициент  $\Delta\beta$  можно представить:

$$\Delta\beta = \frac{2\pi n^{(2)} I}{\lambda_0} \cdot \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |F(x, y)|^4 dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |F(x, y)|^2 dx dy}.$$

Коэффициент связи встречно распространяющихся волн  $\Re$ , согласно [12], равен:

$$\Re = \frac{\pi}{\lambda_0} \cdot \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} n_{\text{ИФП}}^2(z) - \langle n_{\text{ИФП}}^2(z) \rangle \cdot |F(x, y)|^2 dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |F(x, y)|^2 dx dy}.$$

Для произвольного волоконно-оптического сегмента система уравнений (6) с переменными коэффициентами может быть решена численными методами. Для случая единственного ИФП, образованного торцами оптоволоконного сегмента, когда  $\Re$  перестаёт зависеть от  $z$  (при однородном поперечном распределении и ступенчатом изменении  $n$  в области отражения для  $\Re$ , справедливо:  $\Re = 3\pi|n_2 - n_1|^2/4\lambda_0$ ;  $\beta_k = \beta_{\text{ИФП}} = \pi/L_{\text{ИФП}}$ ). При неизменном и малом затухании  $\alpha$  вдоль линии, малом вкладе нелинейных эффектов, абсолютной когерентности излучения, а также при допустимости представления параметра распространения  $\beta(\omega)$  в виде ряда Тейлора вблизи  $\omega_0$ , соответствующей  $\lambda_0$ , когда существенный вклад в искажение сигнала вносят лишь дисперсионные эффекты второго порядка (с параметром  $\beta_2$ ), решение системы (6), состоящей из двух уравнений, можно искать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \tilde{A}_f(z, \omega) &= \tilde{A}_f(0, \omega) \cdot \\ &\cdot (A_1 \cdot \exp(jqz) + A_2 \cdot \exp(-jqz)), \\ \tilde{A}_b(z, \omega) &= \tilde{A}_b(0, \omega) \cdot \\ &\cdot (B_1 \cdot \exp(jqz) + B_2 \cdot \exp(-jqz)), \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\tilde{A}_f(0, \omega)$  характеризует Фурье-преобразование импульса, входящего в ИФП<sup>7</sup>; коэффициенты  $A_1, A_2, B_1$  и  $B_2$ , согласно [7], равны:

$$\begin{aligned} (q - \delta) \cdot A_1 &= \Re \cdot B_1, \quad (q + \delta) \cdot B_1 = -\Re \cdot A_1, \\ (q - \delta) \cdot B_2 &= \Re \cdot A_1, \quad (q + \delta) \cdot A_2 = -\Re \cdot B_2, \end{aligned}$$

а  $q = \pm\sqrt{\delta^2 - \Re^2}$ , причём знак следует выбирать так, чтобы модуль эффективного коэффициента отражения  $r(q)$  оставался меньше 1;

$$r(q) = \frac{q - \delta}{\Re} = -\frac{\Re}{q + \delta}.$$

Величина  $\delta$  для рассматриваемого случая может быть представлена:

$$\delta = \beta(\omega) - \beta_{\text{ИФП}} = \beta_0 + \frac{\beta_2}{2}(\omega - \omega_0)^2 - \beta_{\text{ИФП}},$$

где  $\beta_0$  – линейная постоянная распространения световодной моды. Для того, чтобы получить функцию  $A_f$  во временной области, следует записать соотношение:

$$\begin{aligned} A_f(z, t) &= \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{A}_f(0, \omega) \cdot (A_1 \cdot \exp(jqz - j\omega t) + \\ &+ A_2 \cdot \exp(-jqz - j\omega t)) d\omega, \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\tilde{A}_f(0, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} A_f(0, t) \cdot \exp(j\omega t) dt$ ;  $A_f(0, t)$  – начальная форма входного импульса, которая подлежит определению.

### **Задача поиска параметров импульса, форма огибающей мощности которого в меньшей степени искажается в оптоволоконном тракте**

По смыслу решаемой задачи представляет интерес определение формы огибающей мощности и формы чирпа начального импульса таким образом, чтобы искажения со стороны оптоволоконного тракта в меньшей степени суммарно искажали форму огибающей мощности. Иными словами, решение будет считаться найденным, если форма переданного импульса будет в основном<sup>8</sup> соответствовать

<sup>7</sup> В рассматриваемой задаче интерес представляет волна, распространяющаяся в прямом направлении.

<sup>8</sup> Более правильным должен считаться подход фрактальных оценок рассматриваемых форм, что является предметом дальнейшего исследования.

форме входного импульса, что позволит использовать параметры рассматриваемой формы для передачи информации. Введём функциональную меру искажений следующим образом:

$$\mu(z, t) = CKO(A_f(z, t) - A_f(0, t)), \quad (9)$$

где СКО – функция среднеквадратического отклонения. Исследуем динамику функции  $\mu$ , а также найдём условия, в частности форму входного импульса  $A_f(0, t)$ , обеспечивающие минимум функции  $\mu$ , устремив её полный дифференциал к нулю:  $\Delta\mu \rightarrow 0$ . Расчёты показывают, что минимальное значение функции  $\mu$  обеспечивается в случае:

$$A_f(0, t) = a_+ \cdot \tanh\left(\frac{\zeta}{3}\right) \cdot e^{j\theta} + a_- \cdot \operatorname{sech}(\zeta) \cdot e^{-j\theta} \quad (10)$$

для  $z$ , кратного  $\lambda_0 \cdot (\theta/3)$ , где

$$a_+ = P_{0.5} \cdot \sqrt{\frac{2}{3r(q_0)}} \cdot \left( \frac{\Re \cdot L_{\text{ИФЛ}} \cdot (2 - r^2(q_0))}{3\pi(1 + r^3(q_0))} \right)^{1/4} \cdot \sin \psi;$$

$$a_- = P_{0.5} \cdot \left( 1 - \sqrt{\frac{2}{3r(q_0)}} \cdot \left( \frac{\Re \cdot L_{\text{ИФЛ}} \cdot (2 - r^2(q_0))}{3\pi(1 + r^3(q_0))} \right)^{1/4} \cdot \sin \psi \right);$$

$$\zeta = \frac{t}{T_0} \cdot \sqrt{\frac{\lambda_0 \cdot L_{\text{ИФЛ}}}{1 - r^3(q_0)}} \cdot \Re \cdot \sin \psi,$$

$$\theta = \frac{4\pi L_{\text{ИФЛ}}}{\lambda_0} \cdot \frac{\delta_0}{\Re \sqrt{1 - r^3(q_0)}} \cdot \cos \psi - \frac{4\delta_0}{\Re(5 + r^3(q_0))} \cdot \operatorname{arctg} \left[ \frac{\operatorname{ctg}(\psi)}{\operatorname{cth}(\zeta/2)} \right],$$

$q_0$  соответствует  $\lambda_0$ ,  $P_{0.5}$  и  $T_0$  – половинная мощность и длительность<sup>9</sup> импульса, а  $\psi$  можно выбрать в любой точке диапазона  $0, \dots, \pi/2$ . Для того, чтобы получить графическое изображение формы (10), например, с целью проведения последующей аппроксимации для технических приложений, а также форму начального chirpa, который требуется задать на стадии модуляции лазера, представим соотношение (10) в виде:

$$A_f(0, t) = \operatorname{Re}(A_f(0, t)) \cdot \exp(j \cdot \operatorname{Im}(A_f(0, t))).$$

Так как частотный начальный chirp импульса<sup>10</sup>  $C_\omega(t)$  можно получить в виде производной по времени от фазы:

$$C_\omega(t) = \frac{\partial \operatorname{Im}(A_f(0, t))}{\partial t},$$

то с учётом известной взаимосвязи длины волны и круговой частоты  $\lambda = 2\pi c/\omega$ , откуда следует

$$\Delta\lambda = -\lambda_0^2 \cdot \Delta\omega/2\pi c, \text{ представим:}$$

$$C_\lambda(t) = -\frac{\lambda_0^2}{2\pi c} \cdot \frac{\partial \operatorname{Im}(A_f(0, t))}{\partial t}. \quad (11)$$

Формы огибающей мощности  $\operatorname{Re}(A_f(0, t))$  и начального chirpa  $C_\lambda(t)$  приведены на рис. 3 и 4. Расчёты показывают, что импульс (пунктирная кривая на рис. 3) состоит из двух характерных частей – короткой и широкой. Определённой физической интерпретацией данного тезиса может служить следующее. С одной стороны, импульс должен быть достаточно узким для того, чтобы укладываться в единственный интерференционный порядок. Так интерференционные искажения первого порядка начальной (широкой) части импульса должны фактически складываться в данную кривую – верхнюю (узкую) часть импульса, тогда они окажутся вырожденными. В связи с этим рассматриваемый импульс имеет фронты, отличающиеся от известных для временных светлых солитонов [6], описываемых следующим соотношением:

$$u(0, \tau) = N \cdot \operatorname{sech}(\tau) \cdot \exp(-j \cdot f(\tau)),$$

где  $N$  определяет порядок солитона,  $\tau$  – параметр времени,  $f(\tau)$  – непериодическая гладкая функция  $\tau$ . С другой стороны, согласно [6, 7], чем более узким является распространяющийся по волоконно-оптической линии импульс, тем, в большей степени, он подвергается дисперсионным искажениям. Отсюда импульс должен быть достаточно широким для уменьшения дисперсионных искажений.

Полученные численно-аналитическим методом входной и переданный импульсы (рис. 3) представляют достаточно ограниченный технический интерес из-за частных требований к параметрам оптоволоконного сегмента. В общем случае уравнения (6) содержат переменные коэффициенты, а также слагаемые, характеризующие нелинейные эффекты и затухание. Численное решение такой системы уравнений для сегмента сети (прим. сеть ОАО МТУ «Кристалл», г. Уфа), содержащей 5 эффективных

<sup>9</sup> Под  $T_0$  понимается интервал времени, в течение которого полностью укладывается импульс по уровню пороговой мощности.

<sup>10</sup> Начальный chirp импульса – это смещение длины волны, генерируемой лазером, по мере нарастания / спада оптической мощности импульса  $P(t)$ , который можно представить в виде  $\lambda(t)$  либо  $\omega(t)$ , соответственно:  $C_\lambda(t)$  или  $C_\omega(t)$  в нашем случае.

элементов ИФП, образованных световодными соединениями, для начального импульса вида рис. 3, кривая 2, показало следующее. Учёт линейного затухания в оптоволоконной системе приводит к незначительному уменьшению мощности, и им в последствии можно пренебречь. Учёт нелинейного изменения показателя преломления приводит к заметному изменению формы импульса (кривая 1 на рис. 5), вследствие чего параметром  $\Delta\beta$  не следует пренебрегать при разработке алфавита форм, используемых в рассматриваемой задаче.

Физическая интерпретация видимых изменений формы может быть представлена следующим образом. Появление столбовой формы вершины импульса связано с действием нелинейного изменения показателя преломления, приводящего к фазовой само- и кросс-модуляции (ФСМ и ФКМ) для прямой и отражённой волн, распространяющихся в оптоволоконной системе. С точки зрения преобразования спектра сигнала, эффекты ФСМ и ФКМ приводят к потере основной частоты несущей и появлению вместо неё двух близких боковых составляющих, так называемый сигнал с потерянной несущей [13]. Это, в свою очередь, приводит к значительному влиянию дисперсии, продолжающей «раздвигать» узкую верхнюю часть импульса. По отношению к предыдущему случаю наблюдается также задержка распространения фронта импульса. Последнее является как результатом нелинейного изменения показателя преломления, так и многолучевой интерференции. Известно [7], что брэгговская решётка, являющаяся интерференционным волоконно-оптическим элементом, приводит к существенной задержке распространяющегося через неё

сигнала и к значительной дисперсии. Колебательные искажения фронтов широкой части импульса типа джиттера (также как и в отсутствие влияния нелинейных эффектов) связаны с действием многолучевой интерференции первого и высших порядков. В данном случае порядок интерференционной картины не ограничен, т.к. не принималась в рассмотрение реальная когерентность излучения. Для конечнокогерентного излучения и с учётом того, что многолучевые интерферометры образованы световодными сегментами значительной длины (десятки и сотни метров), в искажениях будет принимать участие первый (максимум – второй) порядок интерференции, что приведёт к синусоидальному изменению рассматриваемых фронтов, но исчезнет эффект смешивания (джиттер).

С точки зрения передачи информации, связанной с формой огибающей мощности импульса, видно, что положение узкой части импульса остаётся неизменным по отношению к начальному/конечному моменту следования импульса. В небольшой степени меняется крутизна фронтов широкой части импульса. Вычислительный эксперимент с несимметрично расположенной вершиной импульса показал следующее. Дополнительно к представленным искажениям происходит перекося фронтов, который особенно заметно для узкой части. Передний фронт становится более крутым, задний – более пологим, импульс начинает напоминать ударную волну. Представленный результат согласуется с известным [6], полученным для светлых временных солитонов, распространяющихся с учётом ФСМ и ФКМ.

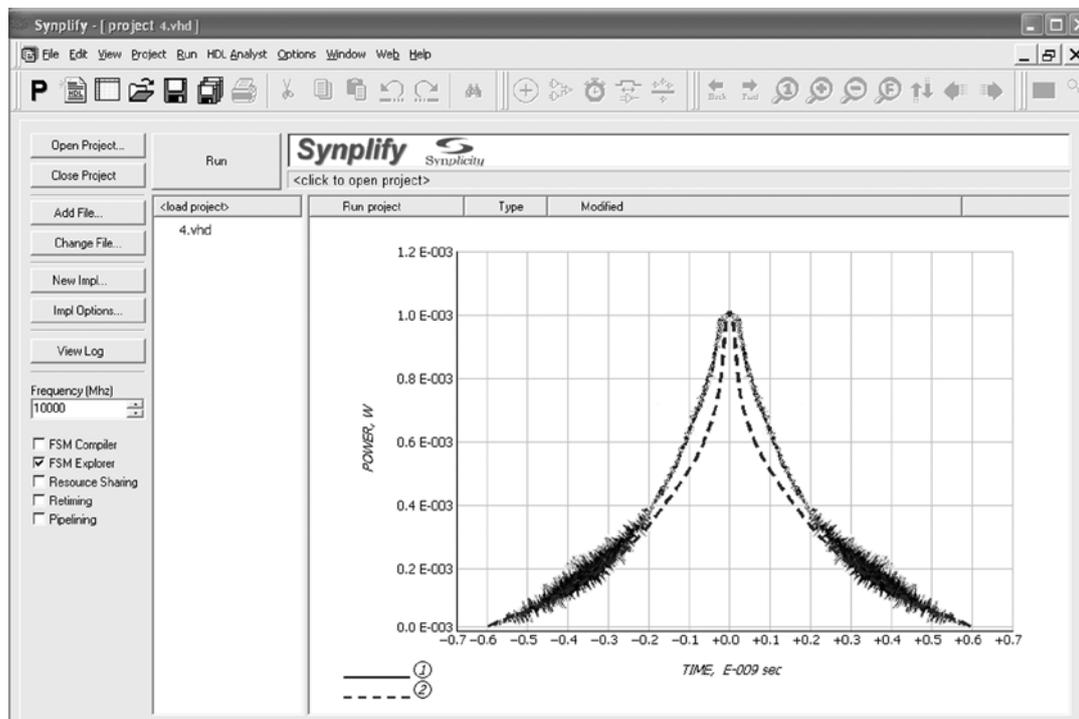


Рис. 3. Формы огибающей мощности переданного (1) и входного (2) импульса, наименее поддающегося искажениям действием дисперсии второго порядка ( $\beta_2 = -20 \text{ ps}^2/\text{км}$ ) и многолучевой интерференции в ИФП, образованного торцами световода типа SF с показателем преломления  $n_2 = 1,485$ . Показатель преломления внешней по отношению к ИФП оптоволоконной системы равен  $n_1 = 1,47$ . Параметр  $\psi$  выбран равным  $\pi/2$ ;  $L_{\text{ИФП}} = 100 \text{ м}$

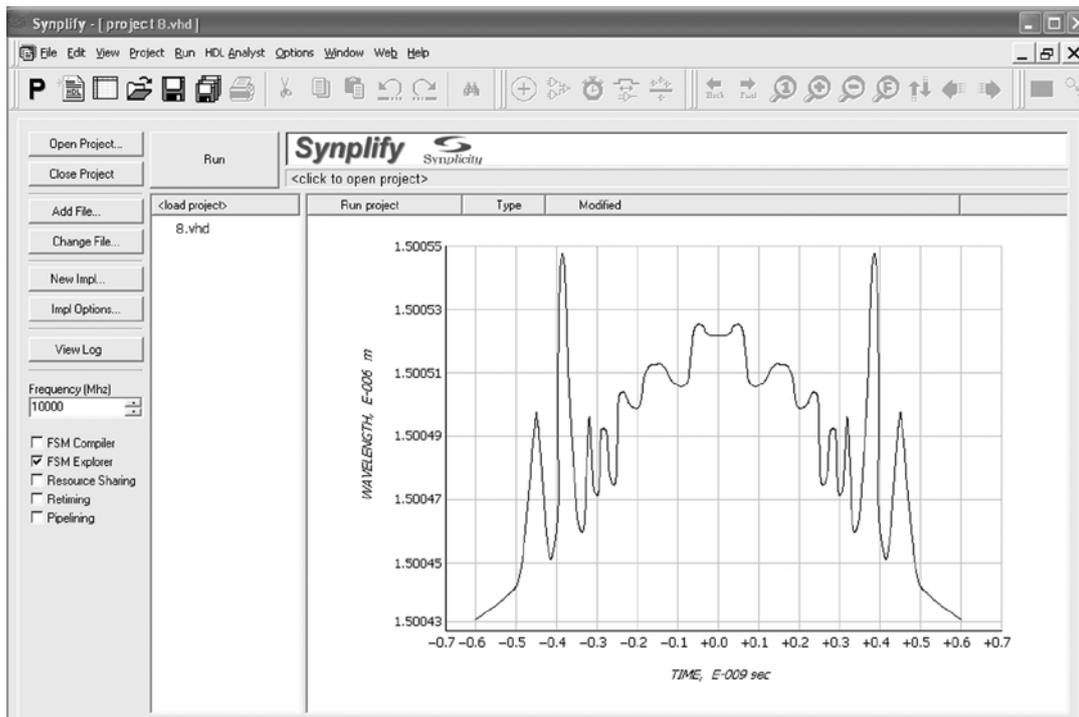


Рис. 4. Форма чирпа импульса, наименее поддающегося искажениям действием дисперсии второго порядка ( $\beta_2 = -20 \text{ ps}^2/\text{км}$ ) и многолучевой интерференции в ИФП, образованного торцами световода типа SF с показателем преломления  $n_2 = 1,485$ . Показатель преломления внешней по отношению к ИФП оптоволоконной системы равен  $n_1 = 1,47$

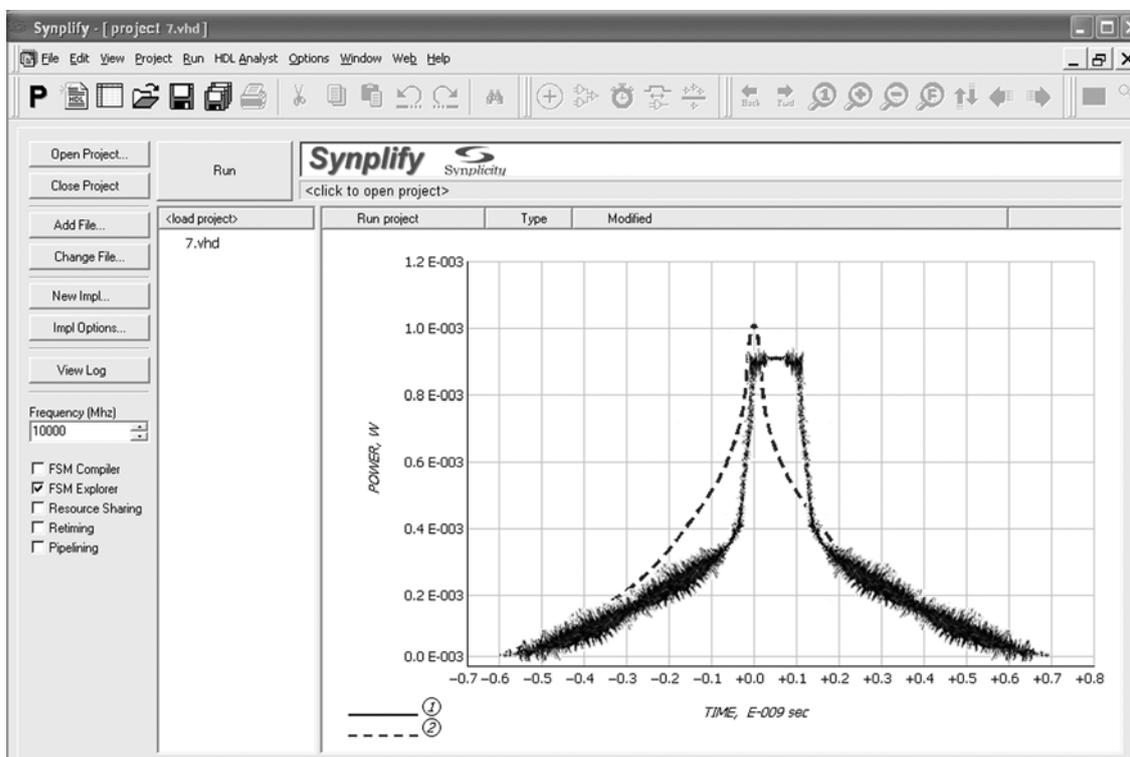


Рис. 5. Формы огибающей мощности переданного (1) и входного (2) импульсов, наименее поддающихся искажениям действием дисперсии второго порядка ( $\beta_2 = -20 \text{ пс}^2/\text{км}$ ), нелинейным изменением показателя преломления, затухания и многолучевой интерференции во многих ИФП, образованных местами стыковки световодов строительных длин и ответвительными элементами сегмента сети ОАО МТУ «Кристалл». Эффективных элементов ИФП всего пять. Линейный показатель преломления колеблется в пределах  $1,4684 \dots 1,4871$  вдоль линии

### Выводы

Для увеличения информационной ёмкости волоконно-оптической системы связи посредством использования двусторонней передачи на единственной рабочей длине волны значимую роль играет снижение или учёт отражённого сигнала. В случае, когда существенного снижения отражений в линии добиться не удаётся, для технической реализации двусторонней передачи можно использовать корректирующую логическую схему, анализирующую отражённый сигнал по принципу рефлектограммы. Для этого целесообразно использовать дополнительные импульсы, вводимые в каждую посылку передаваемых цифровых сигналов в битовый интервал поля примечания с требованием о сохранении длительности и уровня, используемых в системе.

Так как анализ корректности работы цифровых систем определённым образом зависит от правильности считывания формы огибающей мощности дополнительного (адресного) импульса, исследовалась задача нахождения параметров такого импульса, которые обеспечивали бы его наименьшие искажения.

В рамках поставленной задачи было проведено моделирование динамики формы импульса, подвергающегося действию дисперсии, многолучевой интерференции, нелинейного изменения показателя преломления и затухания. Из условия минимизации среднеквадратического отклонения формы переданного от формы отправленного импульсов путём вычислений найдена оптимальная начальная форма. Установлено, что многолучевая интерференция приводит к размытию сигнала действием высших порядков интерференции, влияние которых неограниченно из-за допущения об абсолютно когерентном излучении. Совместное действие дисперсии и нелинейных эффектов типа ФСМ и ФКМ приводит к расширению средней узкой части импульса, сохраняя при этом симметрию формы и увеличивая крутизну фронтов. Линейное затухание оптоволоконного тракта сказывается слабо.

### Литература

1. Султанов А.Х., Гайфуллин Р.Р., Виноградова И.Л. Метод контроля состояния «доор» для волоконно-оптической системы связи // Радиолокация, навигация, связь: Сб. докладов Международной науч.-техн. конф. RLNC`2007. – Воронеж, НПФ «Саквое», 2007, – С. 781-794.
2. Гордиенко В.Н. Многоканальные телекоммуникационные системы: учебник для вузов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2005. – 416 с.
3. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
4. Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. – М.: ЛЕСАРпт, 2005. – 208 с.
5. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учебник для вузов / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. – СПб.: Питер, 2003. – 864 с.
6. Agrawal G.P. Nonlinear fiber optics. – Boston: Academic Press, 2001. – 466 p.
7. Кившарь Ю.С., Агравал Г.П. Оптические солитоны. От волоконных световодов до фотонных кристаллов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 648 с.
8. Волоконно-оптические системы передачи: вопросы оценки работоспособности / А.Х. Султанов, Р.Г. Усманов, И.А. Шарифгалиев, И.Л. Виноградова. – М.: Радио и связь, 2005. – 374 с.
9. Ржевский С.П. Интерференционные волоконно-оптические устройства вычислительной техники и систем управления: Дис... канд. техн. наук: 05.13.05. – Защищена 09.11.91; Утв. 11.05.92. – Уфа, 1989. – 197 с.
10. ОСТ 45.104-97. Стыки оптические систем передачи синхронной цифровой иерархии. Стандарт отрасли. М.: ЦНТИ «Информсвязь». – 1997.–27с.
11. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов / Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.
12. Agrawal G.P. Applications of Nonlinear fiber optics. – San Diego: Academic Press, 2001. –458p.
13. Теория электрической связи / А.Г. Зюко, Д.Д. Кловский В.И. Коржик, М.В. Назаров. – М.: Радио и связь, 1998. – 432с.

## THE PROBLEM OF DETERMINING OPTICAL PULSE PARAMETERS PROVIDING INSIGNIFICANT DISTORTIONS IN A BRANCHED FIBER-OPTIC NETWORK

A.Kh. Sultanov<sup>1</sup>, R.R. Gaifullin<sup>1</sup>, I.L. Vinogradova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

### Abstract

The paper shows the necessity to take into account the reflected signal in a fiber-optic communication network using bidirectional transmission at the only wave length. It is suggested, using an additional network-node coding method, to identify a "loop" state distinguishing it from the resulted reflections caused by nonideality of a fiber-optic path. For successful implementation of this technical idea, it is necessary to provide stability of a transmitted information parameter involving a pulse power envelope. Mathematical simulation of an optical pulse form was performed in the case of multi-beam interference, dispersion, nonlinear variation of the refraction index and the damping index. It is found that nonlinear effects and dispersion are essential factors of distortion, whereas the multi-beam interference is shown as a blurred shape caused by high-order action. Thereby, the effect of the first interference order can be compensated by the selected power envelope at the same time.

**Keywords:** optical pulse, fiber-optic communication network, nonlinear effects, dispersion

**Citation:** Sultanov AKh, Gaifullin RR, Vinogradova IL. The problem of determining optical pulse parameters providing insignificant distortions in a branched fiber-optic network [In Russian]. Computer Optics 2007; 31(2): 39-47.

### References:

- [1] Sultanov AKh, Gaifullin RR, Vinogradova IL. A loop-state control method for the fiber-optic communication network [In Russian]. Radiolocation, Navigation, Communications: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference RLNC 2007. Voronezh: Sequoia Research and Production Company, 2007; 781-794.
- [2] Gordienko VN. Multichannel telecommunication systems. Handbook for university students [In Russian]. Moscow: Hotline-Telecom, 2005; 416 p.
- [3] Varakin LE. Communication systems with noise-like signals [In Russian]. Moscow: "Radio i svyaz" Publisher, 1985; 384 p.
- [4] Listvin AV, Listvin VN. Optical fiber reflectometry [In Russian]. Moscow: LESARart, 2005; 208 p.
- [5] Olifer VG, Olifer NA. Computer networks. Principles, technologies and protocols for network design [In Russian]. St. Petersburg: Peter, 2003; 864 p.
- [6] Agrawal GP. Nonlinear fiber optics. Boston: Academic Press, 2001; 466 p.
- [7] Kivshar YuS, Agrawal GP. Optical solitons: from fibers to photonic crystals [in Russian]. Moscow: "Fizmatlit" Publisher, 2005; 648 p.
- [8] Sultanov AKh, Usmanov RG, Sharifgaliev IA, Vinogradova IL. Fiber optical systems: questions of working ability estimate [in Russian]. Moscow: "Radio i svyaz" Publisher, 2005; 374 p.
- [9] Rzhvesky SP. Interference fiber-optic computer equipment and control systems [In Russian]. Ph.D. Thesis in Engineering Science: 05.13.05. Defended: 09.11.91. Approved: 11.05.92. Ufa 1989; 197 p.
- [10] Industry Standard OST 45.104-97. Interfaces of optical synchronous digital hierarchy transmission systems [In Russian]. Moscow: Informsvyaz' Scientific and Information Centre, 1997; 27 p.
- [11] Snyder A, Love J. Optical waveguide theory. Moscow: "Radio i svyaz" Publisher, 1987; 656 p.
- [12] Agrawal GP. Applications of Nonlinear fiber optics. San Diego: Academic Press, 2001; 458p.
- [13] Zyuko AG, Kloviskiy DD, Korzhik VI, Nazarov MV. Theory of electric communication [In Russian]. Moscow: "Radio i svyaz" Publisher, 1998; 432 p.