

ЗАДАЧА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОПТИМАЛЬНОГО ОПТИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА ДЛЯ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ С ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ

*Виноградова Ирина Леонидовна (преподаватель, e-mail: tks@ugatu.ac.ru),
Уфимский государственный авиационный технический университет*

Аннотация

Для успешной реализации символьного кодирования показана необходимость учёта влияния многолучевой интерференции на форму chirпированного импульса, распространяющегося по оптоволоконному тракту разветвлённой сети либо сети, содержащей активные компоненты управления. Для выявления требуемых огибающей и chirпа проведено математическое моделирование динамики формы оптического импульса в случае действия многолучевой интерференции, дисперсии, нелинейного изменения показателя преломления и затухания. Получено аналитическое выражение для комплекснозначной амплитуды импульса, минимально искажаемого в линии с единственным источником интерференции. Найдена оптимальная форма импульса по минимуму среднеквадратического отклонения выходной формы от входной для конкретного примера. Установлено, что нелинейное преломление приводит к смещению импульса в пределах 5% от длительности периода. Затухание уменьшает пиковую мощность в пределах 10%. Действие дисперсии сводится к расширению пика импульса, интерференции – к размытию его фронтов.

Ключевые слова: chirпированный импульс, искажение формы импульса, волоконно-оптическая линия передачи, многолучевая интерференция.

Введение

Предметом рассмотрения является моделирование динамики формы оптического импульса, распространяющегося по волоконно-оптической линии передачи (ВОЛП), обладающей интерференционными свойствами. Ставится задача определения параметров входного импульса – функций огибающей оптической мощности и chirпа, совместно характеризующих его форму, обеспечивающих минимальное искажение последней на выходе ВОЛП с заданными свойствами. Это представляет интерес для разветвлённых Ethernet и IP-сетей [1], а также сетей Metro WDM [2], для которых характерны короткие сегменты, использование активных интерференционных компонентов управления совместно с полупроводниковыми лазерами, обеспечивающими chirп вводимого излучения, и применение высококогерентных источников света, обеспечивающих многоканальное уплотнение вида DWDM и HDWDM. Появление символьно-кодовых методов уплотнения и миграция телекоммуникационных IP-систем к нейронным сетям [3] приводит к необходимости использования оригинальных импульсных форм, символьным образом кодирующих заданную информацию, например, сетевые адреса Ethernet-сети [4].

Существующие задачи, связанные с исследованием формы оптического импульса, именуется как солитоновые. Замеченное свойство взаимной компенсации действия аномальной хроматической дисперсии и нелинейного преломления для импульса, характеризующегося гауссовой (косекансной или супергауссовой) огибающей мощности и такой же функцией chirпа¹, заложено в основу построения со-

литоновых линий передачи с длинными (100 км) и сверхдлинными (свыше 500 км) регенерационными участками (РУ) [5-7]. Такие РУ характерны для магистральных сетей, которые не обладают разветвлённой топологией [8] и не содержат каких-либо компонентов управления. Поэтому формы временных солитонов получены при следующих условиях:

- 1) минимизация уширения импульса во временной области для протяжённых РУ неразветвлённых ВОЛП с топологией вида «точка-точка»;
- 2) сохранение формы огибающей мощности после солитон-солитонного взаимодействия.

Как правило, при решении подобного рода задач, согласно материалам сборников [5, 6], искомым параметром является длина РУ в зависимости от входных пиковой мощности, длительности и заданной огибающей мощности солитона. Внедрение на РУ ВОЛП таких характерных компонентов, как волоконно-оптические усилители (ВОУ), искажающие chirп, привело к необходимости исследования искажений формы оптических импульсов, прошедших через такие устройства. Так, в [9] получены соотношения, характеризующие функциональную взаимосвязь выходной огибающей мощности и входного chirпа для импульса вида «меандр» [10] на входе ВОУ EDFA. Какие-либо интерференционные свойства системы не рассматривались. В [11] также выявлено влияние ВОУ на параметры оптического импульса. Снизить искажение формы последнего, распространяющегося через РУ ВОЛП с произвольным видом дисперсии, преломления, а также обладающего возможным эффектом фазовой модуляции, связанным с ВОУ, призван метод экспериментальной подстройки параметров оптического импульса [12]. Метод основан на вырезании частей импульса с произвольной длительностью в течение периода последнего и произвольной комбинацией этих частей. Влияние многолучевой интерференции, а так-

¹ Функцией chirпа, линейно связанной с функцией огибающей мощности [5].

же возможность получения произвольного чирпа в [12] не исследовались.

В данной задаче известные решения и методы не актуальны, так как, во-первых, не актуальна задача длительного распространения импульса по протяжённому тракту ввиду технических принципов построения перечисленных сетей, во-вторых, при появлении в линии нескольких посылок одновременно в цифровой системе объявляется коллизия [1] и возобновление передачи начинается в следующий случайный момент времени (свойства сетей со статистическим мультиплексированием).

Кроме того, в солитоновых задачах нет обязательной привязки (главной цели) в сохранении формы импульса, а именно – огибающей оптической мощности для, например, её последующего сравнения с изначальной кривой с выработкой количественной меры несоответствия [4]. Важна неизменная длительность импульса, а 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 [5-7], что в рассматриваемом случае является негативным фактором.

Напротив, в солитоновых задачах не учитывается неизбежно присутствующая многолучевая интерференция, которая неизбежно приведёт к искажению известных решений вследствие того, что система многолучевых интерферометров, являющаяся моделью разветвлённого линейного тракта [13], обладает свойствами фильтра, влияющего на чирп импульса, соответственно меняя его свойства. Известные решения, полученные для так называемых брэгговских солитонов [14], могут оказаться справедливыми для системы не взаимодействующих и идентичных по параметрам многолучевых интерферометров. Однако реальный оптоволоконный тракт, согласно [13], представим системой взаимодействующих и существенно неидентичных по параметрам многолучевых интерферометров. 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 [15], в которых показано лишь частное применение данного предположения. Очевидно, что в общем случае необходимо учитывать реальные динамические свойства полупроводникового источника. В отдельных случаях может оказаться полезным рассмотрение функционально независимых чирпа и огибающей мощности, т.е. формы импульса, получаемой с применением функционального модулятора [3, 4].

Таким образом, задача состоит в нахождении временной зависимости комплекснозначной амплитуды импульса на входе ВОЛП с заданными свойствами, наименьшим образом отличающейся от выходной амплитуды при условиях:

1) существования таких искажающих факторов, как дисперсия оптоволоконна, нелинейное преломление

и многолучевая интерференция, связанных со свойствами оптоволоконна или функционированием устройств управления. Нелинейное изменение показателя преломления является незначительным и может рассматриваться как возмущение [14];

- 2) существования ограничений на длительность и пиковую мощность импульса;
- 3) слабом влиянии затухания на коротких сегментах ВОЛП;
- 4) допустимости приближения плоским фронтом распространяющегося на ВОЛП излучения, что обеспечивается слабонаправляющими свойствами используемых волокон [16];
- 5) распространения на ВОЛП непрерывной импульсной равноскажной последовательности, когда длительности импульсов равны длительностям интервалов между ними;
- 6) реализуемости огибающей мощности и чирпа, связанных с реальными динамическими свойствами светоизлучающего устройства, не допускающими их скачкообразное изменение.

На основании входной комплекснозначной амплитуды будут получены входные огибающая мощность и чирп импульса, оптимального по минимуму искажений для короткосегментной разветвлённой ВОЛП с произвольными параметрами.

1. Модель эволюции огибающей импульса под действием искажающих факторов оптоволоконного тракта

Показатель преломления разветвлённой оптоволоконной линии, рис. 1, 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 ω_0 , соответствующей рабочей длине волны $\lambda_0 = 1550$ нм, $\bar{n}(\omega_0) \cong 1,48$ для световодов типа SF [17]; $n^{(2)}$ – керровский коэффициент, определяющий нелинейную составляющую коэффициента преломления, обладает слабой зависимостью от частоты излучения, для кварцевых волокон в диапазоне ближнего инфракрасного излучения $n^{(2)} \approx 2,4 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{Вт}^2$ [14]; 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).

В данном случае для одного из сегментов $n_{\text{нфл}}(z)$ может быть представлена:

$$n_{\text{нфл}}(z) = \begin{cases} n_1 - \bar{n}, & z \in [0, L_1]; \\ n_2 - \bar{n}, & z \in [L_1, L_2]; \\ n_3 - \bar{n}, & z \in [L_2, L_3]; \\ n_4 - \bar{n}, & z \in [L_3, L_4]. \end{cases}$$

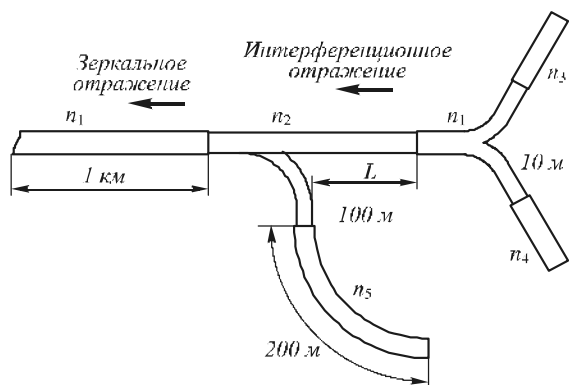


Рис. 1. Схема световодного линейного тракта, собранного из световодов с отличающимися параметрами

Функция $n_{\text{ИФП}}(z)$ 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 порядков². Если зависимость $n_{\text{ИФП}}(z)$ имеет выраженные пики (перепады показателя преломления), то появляются отражения и возникает многолучевая интерференция [2, 13] (интерференция Фабри-Перо). 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 $\Delta\delta$ в интерферометре Фабри-Перо (ИФП) в случае приращения $\Delta\lambda$ имеет вид³:

$$|\Delta\delta| = \frac{4\pi n L}{\lambda_0^2} \cdot \Delta\lambda. \tag{2}$$

Видно, что эффективная величина $\Delta\lambda$ обратно пропорциональна длине L . Если для заметного смазывания интерференционной картины необходимо [1]: $\Delta\delta = 3/4 \pi \div \pi$, то получаем соотношение

$$\Delta\lambda = \frac{C_\delta}{L}, \tag{3}$$

где C_δ – константа, зависящая от коэффициента преломления сегмента n , значения рабочей длины волны λ_0 и приращения разности хода лучей $\Delta\delta$, но не зависящая от величины отражённого излучения или от коэффициентов отражения⁴ зеркал(а) ИФП.

Слагаемое $n_{\text{ИФП}}(z)$ может также определяться конфигурацией устройства, реализующего заданную функ-

цию в сети, например, переключение или разветвление [18, 19]. На рис. 2 представлена оптоволоконная схема двухрезонаторного ИФП, второй резонансный контур которого может применяться как для повышения контрастности интерференционной картины, так и для обеспечения контроля (введения обратной связи через дополнительный ответвитель в контуре) работоспособности устройства. Последнее актуально с точки зрения отслеживания, например, термозависимости интерференционной картины интерференционного полностью оптического переключателя.

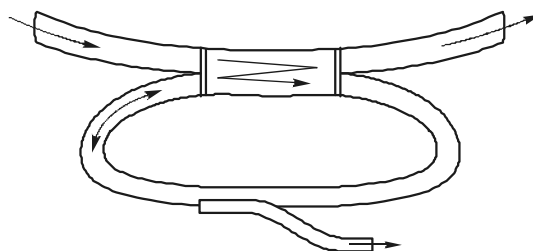


Рис. 2. Оптоволоконная схема двухрезонаторного многолучевого интерферометра

Считая, что нелинейные оптические эффекты оказывают слабый эффект и нелинейную составляющую в (1) можно рассматривать как возмущение, поле в световодной системе (пример на рис. 1) подчиняется уравнению Гельмгольца [14]. Так, для Фурье-преобразования напряжённости электрической составляющей поля \tilde{E} справедливо:

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

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

Для того, чтобы учесть переотражения на ВОЛП, воспользуемся методикой связанных мод [14], которая предполагает, что поле в оптоволоконном тракте может быть представлено в виде прямой и отражённой волн с амплитудами \tilde{A}_f и \tilde{A}_b . В отличие от известной методики [14] будем рассматривать K интерферометров, каждый из которых вносит свой вклад в указанные амплитуды, следовательно, последние в данном случае являются суммой K слагаемых:

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

где $F(x, y)$ характеризует поперечные изменения двух встречных волн, обусловленные модовыми свойствами направляющей структуры; K – количество «эффективных» ИФП в системе [13]; β_k – волновое число k -го ИФП, $\beta_k = \pi/L_k$; j – мнимая единица. Полагая, что \tilde{A}_f и \tilde{A}_b медленно меняются в зависимости от z ввиду малого затухания на ВОЛП, по аналогии с методикой [14], получаем для амплитуд связанных мод в частотном представлении:

² 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.

³ Соотношение справедливо для приближения плоского фронта волны.

⁴ Отражение происходит из-за перепада коэффициентов отражения. Для скачкообразного изменения n , представленного на рис. 1, коэффициент отражения от первого стыка будет равен: $\rho_{12} = |n_1 - n_2| / (n_1 + n_2)$.

$$\sum_{k=1}^K \frac{\partial \tilde{A}_f^{(k)}}{\partial z} = \sum_{k=1}^K \left(j(\beta(\omega) - \beta_k + \Delta\beta) \cdot \tilde{A}_f^{(k)} + j\Re \cdot \tilde{A}_b^{(k)} - \frac{\alpha}{2} \cdot \tilde{A}_f^{(k)} \right) \text{ и}$$

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

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; α – коэффициент линейных потерь в оптоволоконном тракте, в общем случае является функцией z из-за различия параметров световодов, наличия ответвления и усиления на сегменте. Предположение о том, что линейные потери небольшие, позволяет пренебречь вторыми производными в (6). Уравнения (6) справедливы для одномодовых волокон, когда каждый стык порождает единственную отражённую (с учётом малого коэффициента отражения) и прошедшую волны при каждом проходе.

Согласно [14], для случая нелинейности среды керровского типа в пренебрежении нелинейными видами рассеяния и генерации, коэффициент $\Delta\beta$ можно представить:

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

Коэффициент связи встречно распространяющихся волн \Re , согласно [16], равен:

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

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: $\Re = 3\pi|n_2 - n_1|^2/4\lambda_0$; $\beta_k = \beta_{\text{нфл}} = \pi/L_{\text{нфл}}$), при неизменном и малом затухании α вдоль линии, малом вкладе нелинейных эффектов, абсолютной когерентности излучения, а также при допустимости представления параметра распространения $\beta(\omega)$ в виде ряда Тейлора вблизи ω_0 , соответствующей λ_0 , когда существенный вклад в искажение сигнала вносят лишь дисперсионные эффекты второго по-

рядка (с параметром β_2), решение системы (6), состоящей из двух уравнений, следует искать в виде:

$$\tilde{A}_f(z, \omega) = \tilde{A}_f(0, \omega) \cdot (A_1 \cdot \exp(jqz) + A_2 \cdot \exp(-jqz)),$$

$$\tilde{A}_b(z, \omega) = \tilde{A}_b(0, \omega) \cdot (B_1 \cdot \exp(jqz) + B_2 \cdot \exp(-jqz)), \quad (7)$$

где $\tilde{A}_f(0, \omega)$ характеризует Фурье-преобразование импульса, входящего в ИФП⁵; коэффициенты A_1, A_2, B_1 и B_2 , согласно [6], равны:

$$(q - \delta) \cdot A_1 = \Re \cdot B_1, \quad (q + \delta) \cdot B_1 = -\Re \cdot A_1,$$

$$(q - \delta) \cdot B_2 = \Re \cdot A_2, \quad (q + \delta) \cdot A_2 = -\Re \cdot B_2,$$

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 δ для рассматриваемого случая представима:

$\delta = \beta(\omega) - \beta_{\text{нфл}} = \beta_0 + \frac{\beta_2}{2}(\omega - \omega_0)^2 - \beta_{\text{нфл}}$, где β_0 – линейная постоянная распространения световодной моды. Для того, чтобы получить функцию A_f во временной области, следует записать соотношение:

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

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

2. Задача поиска параметров оптимального импульса, форма огибающей мощности которого наименее искажается в оптоволоконном тракте

Представляет интерес определение формы огибающей мощности и формы чирпа начального импульса таким образом, чтобы искажения со стороны оптоволоконного тракта в наименьшей степени суммарно искажали форму огибающей мощности. Иными словами, решение будет считаться найденным, если форма переданного импульса будет в ос-

⁵ В рассматриваемой задаче интерес представляет волна, распространяющаяся в прямом направлении.

новном⁶ соответствовать форме входного импульса, что позволит говорить об оптимальности и использовать параметры рассматриваемой формы для передачи информации. Введём функциональную меру искажений формы импульса следующим образом:

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

где CKO – функция среднеквадратического отклонения. Исследуем динамику функции μ , а также найдём условия, в частности, форму входного импульса $A_f(0, t)$, обеспечивающие минимум функции μ , устремив её полный дифференциал к нулю: $\Delta\mu \rightarrow 0$. Расчёты, выполненные по аналогии с методикой [14], позволяющей получить аналитическое решение для частного случая ВОЛП⁷, показывают, что минимальное значение функции μ обеспечивается в случае:

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

для z , кратного $\lambda_0 \cdot \frac{\theta}{3}$, где

$$a_+ = P_{0,5} \cdot \sqrt{\frac{2}{3r(q_0)}} \times \left(\frac{\Re \cdot K \cdot L \cdot (2 - r^2(q_0))}{3\pi(1 + r^3(q_0))} \right)^{1/4} \cdot \sin \psi;$$

$$a_- = P_{0,5} \cdot \left(1 - \sqrt{\frac{2}{3r(q_0)}} \times \left(\frac{\Re \cdot L \cdot (2 - r^2(q_0))}{3\pi K(1 + r^3(q_0))} \right)^{1/4} \right) \cdot \sin \psi;$$

$$\zeta = \frac{|t - T_0/2|}{T_0} \cdot \sqrt{\frac{\lambda_0 \cdot L}{1 - r^3(q_0)}} \cdot \Re \cdot \sin \psi,$$

$$\theta = \frac{4\pi L}{\lambda_0} \cdot \frac{\delta_0}{\Re \sqrt{1 - r^3(q_0)}} \cdot \cos \psi -$$

$$- \frac{4\delta_0}{\Re(5 + r^3(q_0))} \cdot \arctg \left[\frac{\text{ctg}(\psi)}{\text{cth}(\zeta/2)} \right],$$

q_0 соответствует λ_0 , $P_{0,5}$ и T_0 – половинная мощность и длительность⁸ импульса; $\psi = 3\ell\pi/8$, $\ell = 1, 2, 3, \dots$. Решение получено для ВОЛП, состоящей из K одинаковых, соединённых последовательно ИФП с базой, равной L .

Для того, чтобы получить графическое изображение формы импульса, описываемой соотношением (10), например, с целью последующего уточнения, представляющего интерес для технических приложений, а также форму начального chirpa, ко-

торый требуется задать на стадии модуляции лазера, представим соотношение (10) в виде:

$$A_f(0, t) = M(A_f(0, t)) \cdot \exp(j \cdot \Phi(A_f(0, t))), \quad (11)$$

где M и Φ характеризуют соответственно модуль и фазу комплекснозначной функции $A_f(0, t)$.

Так как частотный начальный chirp импульса⁹ $C_\omega(t)$ связан с производной по времени от фазы:

$$C_\omega(t) = \frac{\partial \Phi(A_f(0, t))}{\partial t}, \quad (12)$$

то с учётом известной взаимосвязи длины волны и круговой частоты $\lambda = 2\pi c/\omega$, откуда следует $\Delta\lambda = -\lambda_0^2 \cdot \Delta\omega/2\pi c$, представим

$$C_\lambda(t) = -\frac{\lambda_0^2}{2\pi c} \cdot \frac{\partial \Phi(A_f(0, t))}{\partial t}. \quad (13)$$

Функции огибающей мощности $M(A_f(0, t))$ и начального chirpa $C_\lambda(t)$ приведены на рис. 3 (пунктирная кривая) и рис. 4.

3. Вычислительный эксперимент по уточнению параметров входного импульса для применимости на произвольной ВОЛП

Исходя из (10), были получены функции огибающей оптической мощности входного импульса – в виде квадрата модуля комплекснозначного выражения для $A_f(0, t)$ и chirpa входного импульса, описываемого соотношением (13). Данный импульс по определению является оптимальным с точки зрения минимизации его искажений на ВОЛП, содержащей K одинаковых элементов ИФП. Поэтому при проведении вычислительного эксперимента имитировалась передача бесконечной равноскажной импульсной последовательности, состоящей из импульсов указанной формы, по ВОЛП, обладающей дисперсией второго порядка с коэффициентом $\beta_2 = -20$ пс²/км и многолучевой интерференцией в единственном ИФП, образованном торцами световода типа SF с показателем преломления $n_2 = 1,485$. Показатель преломления внешней по отношению к ИФП оптоволоконной системы был выбран равным $n_1 = 1,47$; $L = 100$ м. Предполагалось также, что линейное затухание и эффект нелинейного преломления отсутствуют. На рис. 3 и рис. 4 представлены результаты счёта. Форма выходного импульса получена в результате численного решения (6) с указанным входным сигналом.

⁶ Более правильным должен считаться подход фрактальных оценок рассматриваемых форм, что является предметом дальнейшего исследования.

⁷ Для брэгговской решётки, распространяясь в которой наименее уширяется во временной области так называемый брэгговский солитон.

⁸ Длительность импульса по уровню пороговой мощности.

⁹ 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.

Проведённые расчёты показали, что входной оптимальный импульс (пунктирная кривая на рис. 3) должен состоять из двух характерных частей – узкой и широкой. По-видимому, это связано с тем, что интерференционные искажения первого порядка начальной (широкой) части импульса должны фактически складываться в верхнюю (узкую) часть импульса, тогда они окажутся вырожденными. В связи с этим рассматриваемый импульс имеет фронты, отличающиеся от известных для временных светлых солитонов [14], описываемых соотношением:

$u(0, \tau) = N \cdot \text{sech}(\tau) \cdot \exp(-j \cdot f(\tau))$, где N определяет порядок солитона, τ - параметр времени, $f(\tau)$ – непериодическая гладкая функция τ . С другой стороны, согласно [14], чем более узким является распространяющийся по ВОЛП импульс, тем в большей степени он подвергается дисперсионным искажениям. Отсюда импульс должен быть достаточно широким для уменьшения дисперсионных искажений, что и приводит к наличию нижней широкой части.

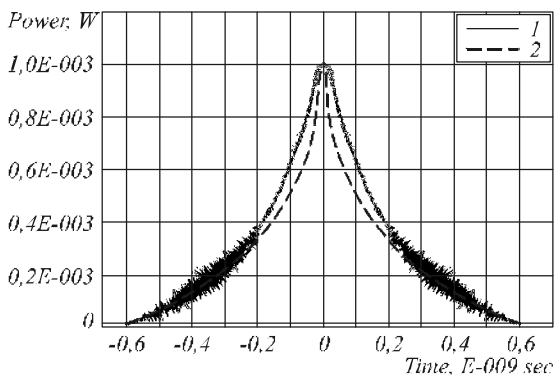


Рис. 3. Формы огибающей мощности переданного (1) и входного оптимального (2) импульса для ВОЛП с единственным ИФП. Параметр ψ выбран равным $3\pi/8$

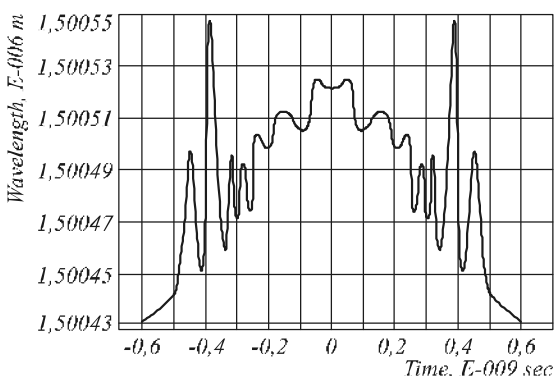


Рис. 4. Форма входного chirp импульса, оптимального для ВОЛП с единственным ИФП. $\psi = 3\pi/8$

Далее был проведён аналогичный эксперимент при использовании этого же входного сигнала для ВОЛП, имеющей практическую значимость. Для расчёта использовалась линия передачи, соответствующая сегменту сети ОАО МТУ «Кристалл», г. Уфа, расположенному между узлами связи по

ул. Комсомольская и по ул. Р. Зорге и содержащая 5 эффективных элементов ИФП. Исследуемая линия характеризовалась следующими параметрами: $L_1=5$ м, $L_2=72$ м, $L_3=100$ м, $L_4=225$ м и $L_5=12$ м, соединёнными последовательно. Дисперсионные параметры были везде приняты равными $\beta_2 = -20$ пс²/км; коэффициенты затухания на сегментах линии составляли: $\alpha_1 = 0,1$ дБ/км; $\alpha_2 = 0,85$ дБ/км; $\alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = 0,2$ дБ/км; коэффициенты преломления световодных сегментов типа SF были приняты: $n_1=1,4855$; $n_2=1,4684$; $n_3=1,4813$; $n_4=1,4825$ и $n_5=1,4871$. Показатель преломления внешней по отношению к системе ИФП оптоволоконной линии был выбран равным $n_{\text{внеш}}=1,47$. Керровский коэффициент, определяющий нелинейное преломление, для всей световодной системы был взят равным $2,1 \cdot 10^{-11}$ м²/Вт². Для упрощения счёта входная импульсная последовательность описывалась не аналитически, а по результатам аппроксимации последней. Результат вычислений - огибающая оптической мощности импульса выходной последовательности - представлен на рис. 5, кривая 1.

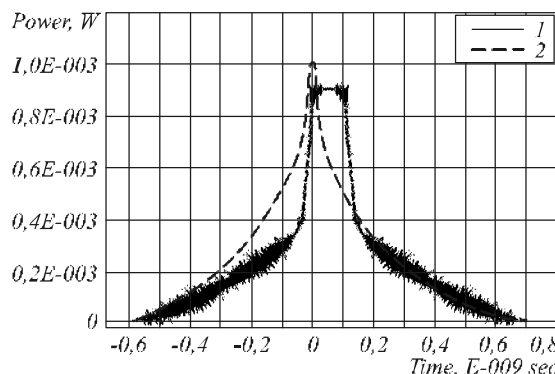


Рис. 5. Формы огибающей мощности переданного (1) по сегменту сети ОАО МТУ «Кристалл» и входного (2) импульса

Численное решение уравнений (6) на реальной ВОЛП, обладающей различными параметрами интерферометров, что приводит к различным амплитудам прошедшего и отражённого сигналов $A_f^{(k)}$ и $A_b^{(k)}$ в зависимости от текущего номера k , производилось с учётом следующих очевидных соотношений между ними, рис. 6:

$$A_b^{(k)} + A_f^{(k+1)} + \alpha_c = A_f^{(k)},$$

$$\frac{A_b^{(k)}}{A_f^{(k+1)}} = \rho_{k,k+1} = \frac{|n_k - n_{k+1}|}{n_k + n_{k+1}}. \tag{14}$$

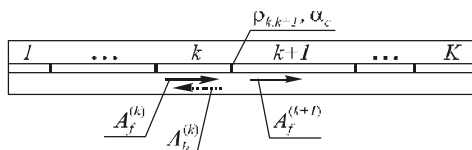


Рис. 6. Иллюстрация прохождения волны с амплитудой $A_f^{(k)}$ через стык $k, k+1$

Предполагалось, что потери при прохождении стыков α_c соответствуют стандарту [17] и не превосходят 0,01 дБм.

Расчёты показали, что учёт линейного затухания в оптоволоконной системе приводит лишь к незначительному уменьшению мощности, и им впоследствии¹⁰ можно пренебречь. По рис. 5 видно, что снижение пиковой мощности происходит не более, чем на 10%. Учёт нелинейного изменения показателя преломления приводит к заметному изменению формы импульса (рис. 5, кривая 1), вследствие чего параметром $\Delta\beta$ не следует пренебрегать при разработке алфавита форм, используемых при кодировании¹¹. Физическая интерпретация видимых изменений формы следующая. Появление прямоугольной 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 [20]. Это, в свою очередь, приводит к значительному влиянию дисперсии, продолжающей «раздвигать» узкую верхнюю часть импульса, рис. 5.

По отношению к предыдущему случаю (рис. 3) наблюдается также задержка распространения фронта импульса – в пределах 5% от периода. Последнее является результатом как нелинейного изменения показателя преломления, многолучевой интерференции, так и дисперсии. Колебательные искажения фронтов широкой части импульса типа джиттера (так же 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 частично когерентного 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).

Но с точки зрения передачи информации, связанной с формой огибающей мощности импульса [4], видно, что хотя положение узкой части импульса остаётся практически неизменным по отношению к начальному / конечному моменту следования импульса, но происходит заметное (более, чем на 25% в смысле

СКО от площади, занимаемой начальной кривой) искажение формы. Это свидетельствует о неоптимальности такого импульса для выбранной ВОЛП.

Поэтому с целью подбора формы импульса, делающего его оптимальным для произвольной ВОЛП с заданными параметрами, решено было выполнять итерационный пересчёт. Для этого соотношение (10) использовалось для получения первоначально вводимой импульсной последовательности. После чего производилось численное решение уравнений (6) с получением выходного сигнала. Для упрощения расчётов численное решение производилось для кривых, аппроксимирующих огибающую мощности и чирп для импульсов вида (10).

Входной и выходной сигналы сравнивались по критерию СКО, и параметры¹² μ (см. соотношение 9) запоминались. На следующем итерационном шаге производилось незначительное изменение одной из входных кривых, характеризующих огибающую мощности или чирп, по эвристическому алгоритму [21]. После чего в результате решения (6) вновь появлялся выходной сигнал и новое значение μ^* . Если оказывалось, что $\mu^* > \mu$, то изменение производилось в обратную сторону. Иначе, при $\mu^* < \mu$, вновь производились аналогичные изменения. Алгоритм заканчивал работу, когда отличия входных и выходных кривых не превышали 15% в течение 10 идущих подряд итераций. Уточнение указанного процентного соотношения приводило к существенному увеличению времени счёта.

В рамках представленной концепции получена огибающая оптической мощности входного импульса (рис. 7, кривая 2), искажающегося не более, чем на 15%, при передаче по представленному выше сегменту сети ОАО МТУ «Кристалл». Это позволяет кодировать информацию символьным образом, обеспечивая при этом требование достаточности разделимости близких по формам сигналов [21].

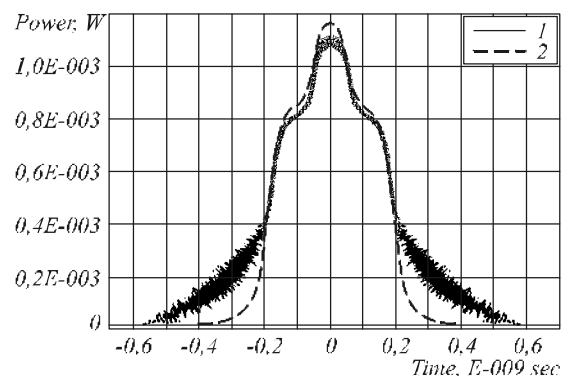


Рис. 7. Формы огибающей мощности переданного (1) по сегменту сети ОАО МТУ «Кристалл» и входного (2) импульса оптимальной формы

¹⁰ При проведении расчётов в других подобных задачах.

¹¹ В задачах, подобных представленной в [4].

¹² Один параметр – для огибающей мощности, другой – для чирпа.

Заклучение

Для увеличения информационной ёмкости волоконно-оптической системы связи посредством использования символично-кодowo-модулированных сигналов, а также расширения функциональности на основе применения активных переключателей, предложено осуществлять подбор параметров сигналов в зависимости от физических свойств системы передачи. Так как анализ корректности работы цифровых систем определённым образом зависит от правильности считывания формы огибающей мощности символично-кодowoго 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, затухания и нелинейного изменения показателя преломления. Из условия минимизации среднеквадратического отклонения формы, переданного от формы отправленного импульсов путём вычислений, найдена оптимальная начальная форма для сегмента ВОЛП, содержащего 5 элементов ИФП, отличающаяся от входной формы не более, чем на 15%. Установлено, что многолучевая интерференция приводит к размытию сигнала действием высших порядков интерференции, влияние которых неограничено из-за допущения абсолютности когерентного излучения. 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 уменьшает пиковую мощность не более чем на 10%.

Литература

1. **Олифер, В.Г., Олифер, Н.А.** Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 2-е изд. / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер // – СПб.: Питер, 2003. – 864 с.
2. **Жирар, А.** Руководство по технологии и тестированию систем WDM. – М.: EXFO, 2001. – 252с.
3. **Оссовский, С.С.** Нейронные сети для обработки информации. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 344с.
4. **Султанов, А.Х., Гайфуллин, Р.Р., Виноградова, И.Л.** Метод коррекции работоспособности сетей связи типа Ethernet и PON на основе применения сложного оптического сигнала. / А.Х. Султанов, Р.Р. Гайфуллин, И.Л. Виноградова //– Уфа.: Гилем, 2007. – 150 с.
5. **Agrawal, G.P.** Nonlinear fiber optics. – Boston: Academic Press, 2001. – 466 p.
6. **Agrawal, G.P., Boyd, R.W.** Contemporary nonlinear optics. – Boston: Academic Press, 2006. – 478 p.
7. **Ахмедиев, Н.Н., Анкевич, А.** Солитоны. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 304 с.
8. Рекомендация МСЭ-T G.958 Цифровые линейные системы, базирующиеся на синхронной цифровой иерархии и предназначенные для работы на оптоволоконных кабелях. Стандарт отрасли. М.: ЦНТИ “Информсвязь”. – 2000. – 56 с.
9. **Кринов, И.В., Фомин, В.В.** Искажение формы оптических импульсов при прохождении через волоконный

- усилитель, обусловленное чирпом длины волны задающего полупроводникового лазера // Научная конференция МФТИ: Сб. докладов XLIV научн. конф. МФТИ. – Долгопрудный, НИФ МФТИ, 2001. – С. 645–651.
10. ITU-T Rec. G.959.1 - Physical Layer Aspects of Optical Networks (2.98).
 11. **Фотиади, А.А., Киян, Р.В., Шакин, О.В.** Наблюдение пассивной модуляции добротности в эрбиевом волоконном лазере при малых мощностях накачки/ А.А. Фотиади, Р.В. Киян, О.В. Шакин // Письма в ЖТФ. – 2001. – Т. 27, № 10. – С. 79–85.
 12. **Зюзин, Ю.Б.** Способ формирования импульсов лазерного излучения / Ю.Б. Зюзин // SciTecLibrary.ru. – 2002. – № 9. – С. 180–181.
 13. **Султанов, А.Х.** Волоконно-оптические системы передачи: вопросы оценки работоспособности / А.Х. Султанов, [и другие] // – М.: Радио и связь, 2005. – 374 с.
 14. **Кившарь, Ю.С., Агравал, Г.П.** Оптические солитоны. От волоконных световодов до фотонных кристаллов / Ю.С. Кившарь., Г.П. Агравал, Пер. с англ.; под ред. Н.Н. Розанова // – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 648 с.
 15. **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.
 16. **Снайдер, А., Лав, Дж.** Теория оптических волноводов / Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.
 17. ОСТ 45.104-97. Стыки оптические систем передачи синхронной цифровой иерархии. Стандарт отрасли. М.: ЦНТИ “Информсвязь”. – 1997. – 27 с.
 18. **Виноградова, И.Л.** Характеристики двухрезонаторного интерферометра Фабри-Перо // Радиотехника. – 2002. – № 6. – С. 33–37.
 19. А.с. 1697035 СССР, МКИ⁵ G 02 В 6/28. Волоконно-оптический разветвитель / Р.А. Тухватуллин, Л.Е. Виноградова, И.Л. Виноградова, С.П. Ржевский, Бюлл. № 45. – 1991.
 20. **Гордиенко, В.Н.** Многоканальные телекоммуникационные системы: учебник для вузов / В.Н. Гордиенко, М.С. Тверецкий. – М.: Горячая линия-Телеком, 2005. – 416 с.
 21. **Султанов, А.Х., Гайфуллин, Р.Р.** Программа расчёта искажений оптического импульса задаваемой формы в волоконно-оптической линии передачи. Рег. № 50200500849. Информационный бюллетень ВНИИЦ, Алгоритмы и программы. – 2007. – № 6. – РТО 7 с.

References

1. Computer networks. Principles, technology, protocols / V.G. Olifer, N.A. Olifer. – St-Peter.: Piter, 2003. – 864 p. – (in Russian).
2. **Andre Jirar.** Instruction for technology and testing of WDM system. – Moscow: EXFO, 2001. – 252p. – (in Russian).
3. **Ossovsky, S.S.** Neuron networks for information control. – Moscow: Finance and statistics, 2004. – 344p. – (in Russian).
4. **Sultanov, A.H., Gayfullin, R.R., Vinogradova, I.L.** Method of working ability correction of networks Ethernet and PON with a complex optical signal. – Ufa: Gilem, 2007. – 150 p. – (in Russian).
5. **Agrawal, G.P.** Nonlinear fiber optics. – Boston: Academic Press, 2001. – 466 p. – (in English).
6. **Agrawal, G.P., Boyd, R.W.** Contemporary nonlinear optics. – Boston: Academic Press, 2006. – 478 p. – (in English).
7. **Ahmediev, N.N., Ankevich, A.** Solitons. – Moscow, Fizmatlit, 2003. – 304 p. – (in Russian).

8. Recommendations G.958. Digital line systems, based on synchronous digital hierarchy for fiber optical. Moscow: Informsviaz. – 2000.–56 p. – (in Russian).
9. **Krinov, I.V., Fomin, V.V.** Distortion of optical pulse form in fiber amplifier, caused by chirp of semiconduction laser light wave // Science conf. of MFTI. – Dolgoprudniy, MFTI, 2001, - p. 645 – 651. – (in Russian).
10. ITU-T Rec. G.959.1 - Physical Layer Aspects of Optical Networks (2.98). – (in English).
11. **Fotiady, A.A., Kiyan, R.V., Shakin, O.V.** Observing of passive modulate of quality factor in erbium laser // Letters in JTF. – 2001. – V. 27, № 10. – P. 79 – 85. – (in Russian).
12. **Zuzin, Y.B.** Method of forming pulses of laser // SciTe-cLibrary.ru. – 2002. - № 9. – P. 180 – 181. – (in English).
13. Fiber optical systems: questions of working ability estimate / A.H. Sultanov, R.G. Usmanov, I.A. Sharifgaliev, I.L. Vinogradova. - Moscow: Radio & Svyaz, 2005. – 374 p. – (in Russian).
14. **Kivshar, YSC., Agrawal, G.P.** Optical solitons. From fibers to photons. – Moscow, Fizmatlit, 2005. – 648 p. – (in Russian).
15. **Rjevsky, S.P.** Interference fiber-optical devices from computed technique and control system : Tezis.. techn. science: 05.13.05. - Aproved.11.05.92. - Ufa, 1989. – 197p. – (in Russian).
16. **Snayder A., Lav J.** Theory of optical fibers. – Moscow: Radio & Svyaz, 1987.– 656 p. – (in Russian).
17. ITU-T Rec. 45.104-97. Joints of optical synchronous digital hierarchy systems. Moscow: Informsviaz. – 1997.– 27p. – (in Russian).
18. **Vinogradova, I.L.** Characteristics of double resonator Fabry-Perot interferometer // Radiotekhnika. - 2002.- № 6. - p. 33 - 37. – (in Russian).
19. Author certificate № 1697035, G 02 B 6/28. Fiber optical splitter / R.A. Tuhvatullin, L.E. Vinogradova, I.L. Vinogradova, S.P. Rjevsky, Bulletin № 45. – 1991. – (in Russian).
20. **Gordienko, V.N.** Multicannel telecommunications systems. - Moscow: Goryacha-Liniya Telecom, 2005. - 416 p. – (in Russian).
21. **Sultanov, A.H., Gayfullin, R.R.** Program of distortions account for fiber optical pulse form in translate line. Reg. № 50200500849. Inform. bulletin «Algorithms & programs», - № 6, 2007. - 7 p. – (in Russian).

PARAMETERS DEFINITION TASK OF AN OPTIMUM OPTICAL PULSE PROPAGATION IN A LINE WITH INTERFERENCE PROPERTIES

*Vinogradova Irina Leonidovna (lector, e-mail: tks@ugatu.ac.ru),
Ufa state aviation technical university*

Abstract

The necessity of influence multibeam interference is shown on the form of chirped pulse, extending on fiber-optic line or network active components. For successful realization of symbolical coding in similar networks an invariance of transmitted information parameter consisting in the form of bending around capacity of pulse. The mathematical modeling of the optical pulse form changes in case of action multibeam interference, dispersion, nonlinear change of a refraction parameter and attenuation was carried out for revealing required bending around and chirp. Search of the pulse form was carried out on a minimum deviation of the initial form from for particular example. It is established, that the essential factors of distortions are multibeam interference especially with action of the maximum orders and dispersion; nonlinear refraction and attenuation are displayed more poorly (near 5%). Peak pump attenuated from 10%. In a number of cases the distortion connected with first interference order, can be compensate by selection of bending around capacity.

Key words: chirped pulse, fiber-optical line, multibeam interference, symbolical modulation.

В редакцию поступила 25.12.2008г.