

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СЕГМЕНТА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ

Виноградова И.Л., Зевиг В. Г., Кашибиев А.А., Костюк Д.С.,
Султанов А.Х., Турайзянов Д.И., Хасанов Р.Х.

Статья посвящена исследованию метода, обеспечивающего квазисолитоновый режим передачи на основе волоконно-оптических компонентов, выполняющих положительное chirпирование информационных импульсов. Проведен анализ существующих методов, использующих chirпирование информационного сигнала для компенсации хроматической дисперсии оптическими средствами. Моделирование длительности оптического импульса и его функции chirпа на предлагаемом сегменте позволило оценить параметры сегмента – расстояние между восстанавливающими муфтами и уровень мощности дополнительного излучения. Метод представляет интерес для организации высокоскоростной передачи (40 Гбит/с и более на канал) при невозможности использования электронных или сосредоточенных волоконно-оптических компенсаторов дисперсии.

Ключевые слова: квазисолитоновый режим передачи, нелинейное преломление, фазовая самомодуляция, фазовая кросс-модуляция, потери в волокне, искажение цифрового сигнала, оптические системы передачи.

Введение

«Взрывная» потребность телекоммуникационных систем в полосе пропускания приводит к тому, что битовые скорости на магистрали достаточно быстро выросли от 2,5 и 10 Гбит/с до 40 Гбит/с (STM-256) и даже 50...100 Гбит/с (Metro Ethernet) на канал [1-2] на линиях протяженностью 100 км и более. Но эффективная эксплуатация таких высокоскоростных волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП), а тем более дальнейшее повышение битовой скорости практически наталкивается на существенное искажение, вызванное хроматической дисперсией (ХД) в оптоволокне (ОВ), приводящее к нарушению приема цифрового сигнала. Традиционные методы компенсации дисперсии, основанные на поочередном включении сегментов ОВ с коэффициентами дисперсии различных знаков [3-4], применение локально включаемых устройств, задерживающих определенные спектральные составляющие, тем самым точно выравнивая фазовые скорости их распространения [5], оказываются в такой ситуации недостаточно эффективными. Это и

оправдывает апробацию солитонов [6], или так называемого квазисолитонного режима передачи (КСП) [7], «работающего» с chirпированным линейным сигналом, что позволяет снизить влияние дисперсии посредством использования специфики взаимодействия такого сигнала с материалом ОВ, являющегося нововведением с точки зрения традиционного построения ВОЛП.

Анализ средств компенсации дисперсии, основанных на использовании chirпирования линейного сигнала

В связи с существенным увеличением битовой канальной скорости одним из актуальных способов борьбы с ХД является использование КСП. Последние в основном характеризуются тем, что в задачах анализа режимов приема-передачи сигналов рассматривается не только амплитуда напряженности электрического поля световой волны E (или уровень мощности P) и длительность оптического импульса $T_{\text{и}}$, или в крайнем случае – огибающая оптической мощности (форма импульса), но главным образом – функция chirпа, которая характеризует изменение частоты $\omega_{\text{МГН}}$ (или длины волны $\lambda_{\text{МГН}}$) на протяжении длительности импульса: $C_{\omega}(T) = -\Delta(\omega_{\text{МГН}}(T))_0^{T_{\text{и}}}$, где $\Delta(\cdot)$ – знак дифференциала от функции; $\varphi_{\text{МГН}} = \frac{d\Psi(T)}{dT}$, $\Psi(T)$ – фаза в представлении $P(T) = \text{Mod}(T) e^{j\Psi(T)}$; T – время в системе отсчета, связанной с импульсом $T = t - z\beta_1$, позволяющее уйти от текущего t и дающее возможность не учитывать параметр β_1 в разложении функции $\beta(\omega)$ [6; 8-9]. Знак минус используется вследствие того, что направление отсчета dT физической системы будет противоположно принятому в математике приращению аргумента. Действительно, традиционно эксплуатируемые в России ВОЛП, построенные на ОВ SMF-28, обладают отрицательным характеристическим дисперсионным параметром $\beta_{2,\text{SMF}} \approx -22$ пс²/км (соответственно дисперсионным коэффициентом $D_{\text{ХД,SMF-28}} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \cdot \beta_2 \cong 17$ пс/нм·км [6; 10]) в области длин волн магистральной передачи

$\lambda_0 \cong 1550$ нм. Это приводит к тому, что изначально нечирпированный импульс, все спектральные компоненты линии излучения $\Delta\lambda$ которого, расположенные равномерно на протяжении его длительности, приобретает отрицательный чирп по мере прохождения расстояния z вдоль ВОЛП (см. рис. 1), в результате чего коротковолновые (условно – «синие») компоненты сосредотачиваются в области переднего фронта, а длинноволновые («красные») компоненты – в области заднего фронта.

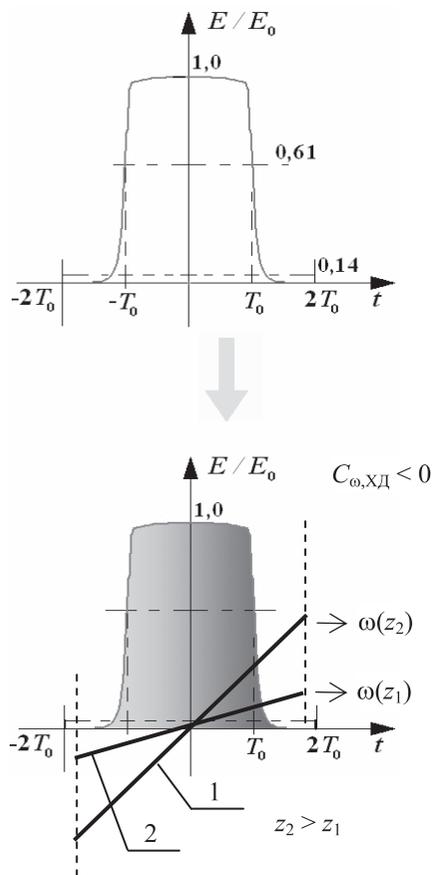


Рис. 1. «Синие» компоненты уходят вперед, а «красные» отстают при $\beta_2 < 0$ и $D > 0$; 1 и 2 – линейные функции чирпа для различных точек на ВОЛП, вызванные ХД [6]. Чем дальше распространяется импульс, тем больше разделение спектральных составляющих. При дальнейшем распространении «синие» составляющие «уходят» дальше, чем полуширина импульса, что и приводит к его уширению во временной области. Представленный супергауссов импульс [6] является моделью используемых на ВОЛП меандровых импульсов

В качестве одного из средств снижения влияния ХД на ВОЛП в настоящее время используются устройства электронной компенсации дисперсии (EDC – electrical dispersion compensate) [11], обеспечивающие (как один из вариантов) изначально положительное чирпирование им-

пульсов, т.е. смещение «красных» компонентов на передний фронт, а «синих» – на задний. Преимуществом EDC, привлекающим в настоящее время значительное внимание к ним, является отсутствие необходимости затрагивать оптический канал, а модернизация линии (при необходимости введения высокоскоростной передачи на ней) сводится к доукомплектации каналообразующего оборудования, рис. 2. Это, безусловно, представляет интерес для вендоров, что также является причиной широкого обсуждения EDC. Но указанный способ обладает и весьма крупными, с точки зрения фундаментальной теории телекоммуникационных систем, недостатками. Главным образом – это уход от принципа построения полностью оптических систем связи [1-2; 5], а с этим – и потеря прозрачности оптического канала по отношению к оборудованию. Так, при замене каналообразующего оборудования «уходит» и оборудование EDC. Кроме того, имеет место удорожание абонентского полукомплекта, что, безусловно, ограничивает интерес абонентов к подключению. И еще, согласно [12], EDC являются системами с прямым фотодетектированием, что в настоящее время представляет основу построения подавляющего большинства фотоприемных модулей, обладающих пределом помехоустойчивости, ограничивающим их работоспособность, при наличии шума уже в 2 дБ. Такую величину вполне может составлять шум усиленного спонтанного излучения (шум ASE) в усилителях EDFA [13], которые уже стали традиционными на ВОЛП.

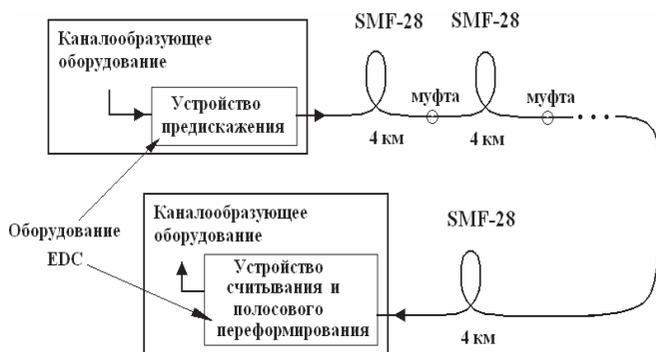


Рис. 2. Схема использования EDC на ВОЛП. Для корректного внесения предискажений важно как можно точнее предварительно измерить дисперсионный параметр ВОЛП

Существующие оптические принципы компенсации ХД основаны на: включении специализированных видов ОБ – DSF и/или специализированного профиля совместно с SMF-28 [3-4]; на применении (например, в линейных муфтах) ком-

пенсаторов на решетках Брэгга, интерферометрах [5] и т.п. Эти способы успешно работают при решении ряда технических задач, тем не менее также обладают определенными недостатками. В частности, схема DSF (DSF+NZDSF; DSF + специальный профиль) + SMF-28 хороша для вновь строящихся ВОЛП, на которых можно выполнить значительные участки линии из световодов со знаком β_2 (или $D_{\text{ХД}}$), противоположным знаком коэффициента $\beta_{2,\text{SMF}}$ (или $D_{\text{ХД,SMF}}$). Но большинство задач компенсации ХД приходится решать уже для эксплуатирующихся сетей, построенных, как известно, на ОВ SMF-28, следовательно, применение такого принципа потребует существенной замены или дополнения (в линейных муфтах) магистрального кабеля, особенно учитывая тот факт, что $|\beta_{2,\text{DSF}}| < |\beta_{2,\text{SMF}}|$ [10; 14]. К тому же известно [3], что при неплохой компенсации ХД происходит рост поляризационной модовой дисперсии – ОВ DSF обладают повышенным в сравнении с SMF-28 двулучепреломлением; не говоря уже о том, что дополнительные вставки ОВ или подключение локальных компенсаторов ХД неизбежно приводит к повышению отражения в линии и, возможно, интерференции, эффективно влияющей на коротких длинах (до ~ 1 м), что при определенном стечении обстоятельств может оказаться критичным для работы каналобразующего оборудования волоконно-оптической системы передачи (ВОСП) [15].

Поэтому представляет интерес использование режима КСП как средства компенсации влияния дисперсии на ВОЛП, но создаваемого на основе не электронных, а оптических эффектов и устройств. Как известно [6], положительное chirpирование импульса возникает под действием эффекта фазовой самомодуляции (ФСМ). Но также известно [16-17], что поддерживать баланс между дисперсией групповой скорости (ДГС), вызванной ХД, и ФСМ на протяжении длины ВОЛП, обеспечивая тем самым квазисохранение формы импульса (солитона), является весьма дорогостоящим мероприятием и может представлять интерес лишь для трансатлантических ВОСП. Если речь идет о протяженных сегментах городского масштаба или подключении удаленного (~ 100 км) абонента (корпоративного клиента), целесообразно найти решение подешевле.

Одним из вариантов может служить способ формирования положительного chirpа посредством включения нелинейного оптоволокна (НЛ ОВ) и/или DSF ОВ сразу после передатчика, сигнал которого усиливается бустером [18], см. рис. 3.

Применение ОВ DSF небольшой длины в линейных муфтах обеспечивает не только обратный знак коэффициенту дисперсии по отношению к ОВ SMF-28, но и является средством, в некоторой мере способствующим нелинейному режиму преломления, обеспечивающему ФСМ. А именно – за счет уменьшенного диаметра (4 мкм против 9 мкм [14]) и, соответственно, площади сердцевины: $S_{\text{DSF}}/S_{\text{SMF-28}} \approx 5$, что непосредственно влияет на интенсивность излучения, обеспечивая нелинейный режим преломления.

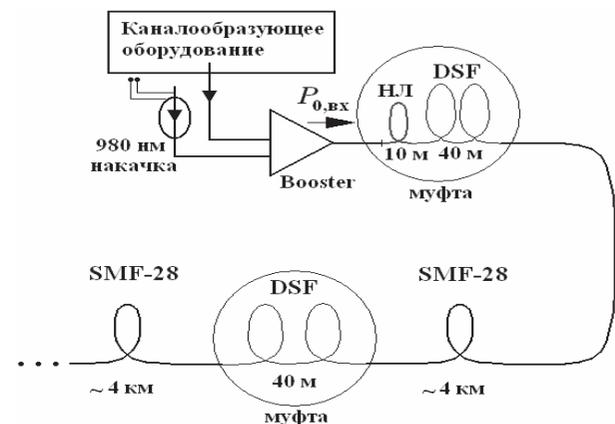


Рис. 3. Схема создания КСП на ВОЛП независимым от каналобразующего оборудования полностью оптическим способом

Усиленный мощный импульс с амплитудой $P_{0,\text{вх}}$, проходя через НЛ ОВ и/или DSF ОВ, приобретает положительный chirp из-за ФСМ и/или положительного коэффициента $\beta_{2,\text{DSF}}$ и далее, распространяясь через SMF-28, составляющих основу современных ВОЛП, подвергается перестройке спектральных составляющих, подобно тому, как это иллюстрирует рис. 1. Соответственно, в процессе преобразования chirpа от начального положительного на отрицательный – на выходе ВОЛП под действием ДГС с $\beta_{2,\text{SMF-28}} < 0$, длительность импульса остается практически неизменной, что согласуется с результатами исследований, представленными в [6]. При определенных условиях, а именно при совпадении огибающей оптической мощности и функции chirpа импульса на входе ВОЛП, не только длительность, но и его форма может оставаться практически неизменной под действием ДГС (без учета снижения амплитуды импульса под действием километрического затухания ОВ α [7]).

Но схема, представленная на рис. 3, обладает таким недостатком, как неизбежное спадание амплитуды импульса по мере следования вдоль ВОЛП, что ведет к отсутствию эффективного

влияния ФСМ с точки зрения внесения положительного chirпирования.

Подход к построению сегмента волоконно-оптической линии, поддерживающего квазисолитонный режим передачи

Для преодоления недостатка схемы на рис. 3 предлагается использовать легированные эрбием световоды EDFA и совместно с ними – и НЛ ОВ, а возможно, и ОВ DSF, кроме входной также и в последующих линейных муфтах (см. рис. 4). При этом накачку расположенных на линии EDFA ($\lambda_{EDFA} = 980$ нм) производить дистанционно – из ближайшего узла связи на ВОЛП [19], передавая излучение накачки совместно с информационным сигналом ($\lambda_{S,0} = 1550$ нм). Это позволит сохранить полностью оптический принцип при КСП, то есть не использовать электрические компоненты в зоне ВОЛП. Кроме того – усилить позитивное влияние эффекта нелинейного преломления: дополнительно к влиянию со стороны НЛ ОВ в муфтах – еще и появление фазовой кросс-модуляции (ФКМ) между излучением накачки и информационного сигнала в ОВ SMF-28, также вызывающей положительное chirпирование, увеличивая тем самым расстояние до следующего пункта регенерации с необходимостью восстановления электронными средствами [20].

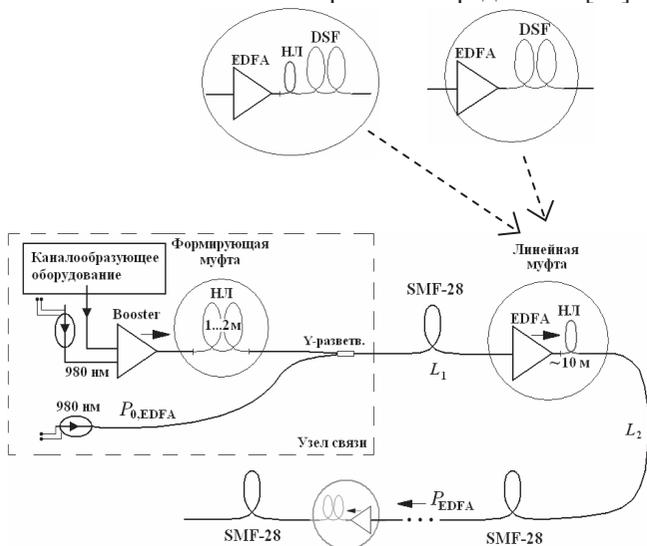


Рис. 4. Схема создания КСП на ВОЛП с дистанционной накачкой EDFA, расположенных в муфтах восстановления КСП (накачка EDFA является непрерывной). Муфта может содержать дополнительно ОВ DSF, между муфтами восстановления могут располагаться соединительные муфты, традиционные для ВОЛП

Пусть импульс, поступающий в бустер, представим следующим образом (с учетом неизбежного начального chirпирования, обусловленного

свойствами модуляции полупроводникового лазера [6; 8-9]):

$$\dot{E}_{1550}(T, \mathbf{r}, z = 0) = E_0 \dot{F}(T, \mathbf{r}) \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{2\ell}\right) \times \exp\left(j \frac{C^A}{2} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{2\ell+1} + j\omega_{u,0} \cdot T\right), \quad (1)$$

где $\dot{F}(t, \mathbf{r})$ – поперечная составляющая поля, которую при дальнейшем рассмотрении можно не учитывать в силу одномодового характера распространения световой волны и свойств фотоприема (поперечная структура поля усредняется фотоприемником); параметр ℓ супергауссового импульса можно принять $\cong 5$, что обеспечит соответствие меандровому импульсу с характеристиками фронт / непрерывная область таими же, как и у импульсов в 40 Гбит/с; параметр $C^A \approx 0,036$; $\omega_{u,0}$ – начальная центральная частота, соответствующая $\lambda_{S,0}$. Соотношению (1) соответствует импульс, представленный на рис. 5.

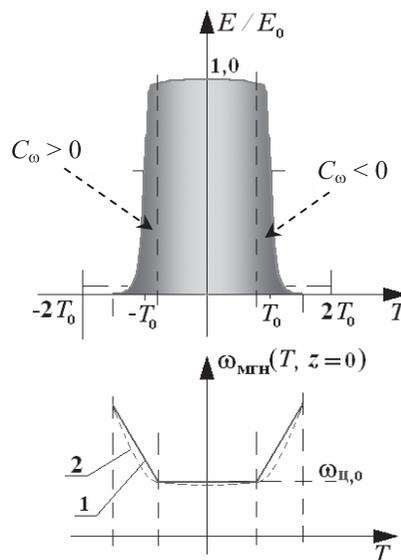


Рис. 5. Иллюстрация входного импульса, содержащего начальное chirпирование: 1 – линейное изменение ω , соответствующее реальной физической системе; 2 – получаемое из (1) изменение частоты ω

Изменение параметров импульса в выходной (формирующей) муфте главным образом сопровождается эффектом ФСМ [6]:

$$\frac{\partial \dot{A}_{1550}}{\partial z} = j\gamma_{1550}^{HL} \left| \dot{A}_{1550} \right|^2 \cdot \dot{A}_{1550}, \quad (2)$$

где $\dot{A}_{1550} = \dot{E}_{1550} / E_0 \dot{F}$; $\gamma_{1550}^{HL} \cong \frac{n_{HL,k} \cdot \omega_{u,0}}{c \cdot S_{эфф}}$, $S_{эфф}$ –

эффективная площадь модового пятна, примем $s_{эфф} \approx 1,2 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$; c – скорость света в вакууме; $n_{НЛ,к}$ – нелинейный (керровский) показатель преломления НЛ ОВ; что приводит к выраженному положительному chirпированию несмотря на изначально различным образом (положительно и отрицательно) chirпированные фронты.

Действительно, изначально положительно chirпированный фронт получает еще большее положительное chirпирование, и в результате его длительность увеличивается; а изначально отрицательно chirпированный фронт укорачивается (практически сходит на нет). В конечном итоге импульс приобретает все же положительное chirпирование, так как воздействие НЛ ОВ и вызываемый его нелинейностью chirп существенно, чем величина изначально отрицательного chirпа переднего фронта.

Дальнейшее распространение в линейном световоде SMF-28 длиной L_1 под действием ДГС, ФСМ, ФКМ и затухания можно описать следующей системой:

$$\frac{\partial \dot{A}_{1550}}{\partial z} + \frac{j}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 \dot{A}_{1550}}{\partial T^2} = j \gamma_{1550}^{SMF} \left(|\dot{A}_{1550}|^2 + 2 |\dot{A}_{980}|^2 \right) \dot{A}_{1550} - \frac{\alpha_{1550}}{2} |\dot{A}_{1550}|; \quad (3)$$

$$\frac{d \dot{A}_{980}}{dz} = - \frac{\alpha_{980}}{2} |\dot{A}_{980}|.$$

Накачка EDFA непрерывна, поэтому второе уравнение характеризует уменьшение мощности $P_{EDFA}(z) \cong P_{0,EDFA} \cdot e^{-\alpha_{980} \cdot z}$ под действием затухания; $\alpha_{980} \cong 2,3$ дБ/км. Характер изменения величины \dot{A}_{1550} в восстанавливающей муфте может быть описан уравнением:

$$\frac{\partial \dot{A}_{1550}}{\partial z} = j \gamma_{1550}^{НЛ} \left(|\dot{A}_{1550}|^2 + 2 |\dot{A}_{980}|^2 \right) \dot{A}_{1550} + \mathfrak{R} \cdot |\dot{A}_{980}|, \quad (4)$$

где по-прежнему действует ФКМ и ФСМ; ДГС и километрическое затухание отсутствуют ввиду малой длины НЛ ОВ; причем дополнительно имеет место усиление импульса под действием излучения накачки (с коэффициентом передачи \mathfrak{R}). Для упрощения модели уравнение для \dot{A}_{980} рассматривать не будем, а примем, что изменение указанной величины из-за отдачи части энергии на подкачку информационного сигнала (километрическим затуханием также пренебрегаем) составляет ступеньку порядка 18 ... 23 дБ (для световода EDFA длиной ~ 15 м) [13]. В каждом из случаев пренебрегаем отражением и интерференционными эффектами.

Последовательное решение уравнений (2)-(4) на длине z от 0 до $Z_{НЛ,0}$; от $Z_{НЛ,0}$ до Z_{L1} ; от Z_{L1} до $Z_{НЛ,1}$ и так далее с начальным условием (1) методом численного интегрирования на базе программного пакета Synplify 8.1 позволило получить кривые, характеризующие изменение мгновенной частоты на протяжении T_u (см. рис. 6) и величину T_u (по уровню относительной амплитуды 0,14) при распространении его вдоль ВОЛП (см. рис. 7). Расчеты проведены для следующих параметров физической системы: $T_{и,0} = 2,5 \cdot 10^{-11}$ с, что соответствует битовой скорости 40 Гбит/с (см. рис. 6); $\alpha_{1550} = 0,15$ дБ/км; $\mathfrak{R} = 0,35$ [13]; $\beta_2 = -22$ пс²/км; $n_{нпк} = 8 \cdot 10^{-17} \text{ м}^2/\text{Вт}^2$ [21]; $n_{SMF,k} = 2,4 \cdot 10^{-21} \text{ м}^2/\text{Вт}^2$ [22].

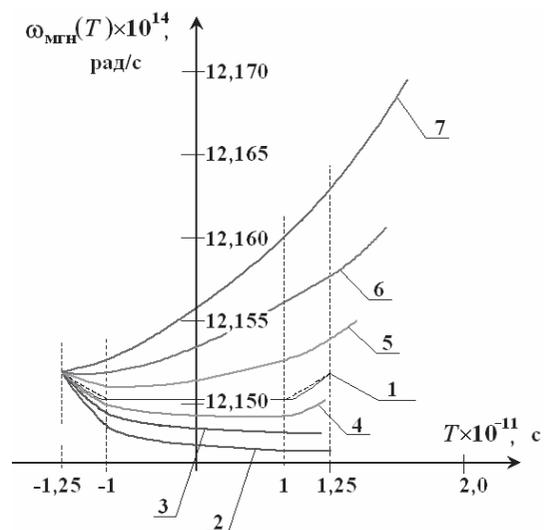


Рис. 6. Изменение мгновенной частоты на протяжении длительности импульса: 1 – характеризует импульс, поступающий на вход бустера (см. рис. 4); 2 – импульс на выходе формирующей муфты; 3 – импульс прошел 15 км вдоль ВОЛП SMF-28; 4 – 35 км вдоль ВОЛП (на рис. 7 представлены более детальные исследования параметра T_u); 5 – 45 км; 6 – 50 км (предельное увеличение длительности, составляющее порядка 10% [23] от $T_{и,0}$) и 7 – 70 км вдоль ВОЛП SMF-28 (это недопустимое увеличение длительности импульса – необходимо на более раннем этапе использовать восстанавливающую муфту)

Видно, что заметное увеличение длительности импульса наблюдается при переходе общего состояния chirпирования из положительной ($C_\omega > 0$) в отрицательную ($C_\omega < 0$) область. Кривые на рис. 6 построены без учета восстанавливающих муфт, что справедливо для первого участка линии на рис. 4. Положительное chirпирование обеспечивает уменьшение длительности импульса, а затем, по мере

дальнейшего влияния ДГС, происходит вновь увеличение его длительности сначала за счет затягивания переднего, изначально chirпированного отрицательно, фронта (см. рис. 5). А затем, с увеличением пройденного расстояния, уже и весь импульс приобретает отрицательное chirпирование, что продолжает увеличивать его длительность. Кривые на рис. 7 построены для сегмента линии передачи, содержащей первую восстанавливающую муфту на расстоянии 50 км от передатчика.

Таким образом, расчеты показали, что в присутствии ФКМ на ВОЛП, вызванной совместной передачей излучения накачки, положительное chirпирование импульса сохраняется несколько дольше (до 7 ... 15 % в зависимости от $T_{и,0}$), что позволяет замедлить его нежелательное уширение под действием ДГС. Согласно аналогичным исследованиям, проведенным для других значений $T_{и,0}$, эффективность применения рассматриваемых средств возрастает с уменьшением начальной длительности импульса. Следует заметить также, что эффекты расширения и сужения более выражены для коротких импульсов.

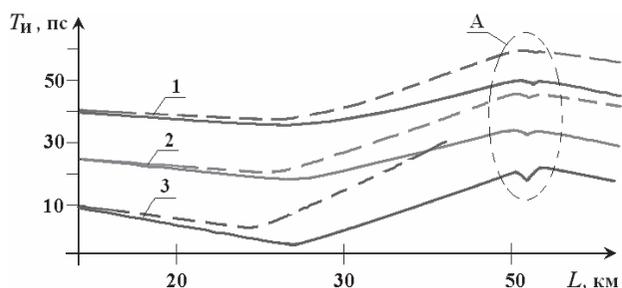


Рис. 7. Изменение длительности импульса при его распространении на исследуемом сегменте: 1 – соответствует битовой скорости передачи 25 Гбит/с [24]; 2 – 40 Гбит/с; 3 – 100 Гбит/с; область А – масштаб по длине L увеличен; штрих-пунктирные линии соответствуют влиянию ДГС в случае, когда накачка EDFA производится в местах расположения усилителей, а не передается совместно с информационным сигналом (неплавности линий связаны, по-видимому, с ошибками вычислений, обусловленными спецификой применяемого программного обеспечения)

Мощность дистанционной накачки $P_{0,EDFA}$ не должна превышать ~ 70 мВт для избежания нежелательного влияния других нелинейных эффектов – вынужденных видов рассеяния излучения и появления гармонических составляющих из-за «смещения волн» [19]. Для $P_{0,EDFA} = 70$ мВт первую восстанавливающую муфту достаточно устанавливать на расстоянии 50

км от передатчика, далее – через 35 км, затем через 20 км и последнюю муфту можно установить не далее 7 км от предыдущей. Таким образом, суммарно получается порядка 112 км до ближайшего пункта с электронной регенерацией сигнала 40 Гбит/с, передаваемого через SMF-28 без локальных компенсаторов ХД. Кроме того, это позволяет сохранять достаточно высоким его уровень мощности. Так, в рассматриваемом примере пиковая мощность импульса не оказывалась ниже 0,75 дБм при мощности на выходе бустера 4 дБм.

Главная цель использования световодов EDFA на ВОЛП состоит не столько в усилении импульса, сколько в создании нелинейного режима преломления, способствующего сохранению длительности импульса. Размещение устройств восстановления КСП чаще (вплоть до каждой строительной длины ОВ) в общем случае может привести к ухудшению итогового результата – кроме неоправданного удорожания системы, может произойти раннее исчерпание излучения накачки, что не позволит обеспечить восстановление на удаленном участке ВОЛП. Исследования показали также, что длину нелинейного ОВ с принятым коэффициентом нелинейности достаточно выбирать в пределах до 10 м.

Выводы

Предложен метод поддержания квазисолитонного режима передачи с использованием волоконно-оптических компонентов, выполняющих положительное chirпирование информационных импульсов. Дистанционная накачка EDFA способствует усилению эффекта нелинейного преломления и тем самым также оказывает благотворное влияние на поддержание КСП. Выполнено моделирование параметров предлагаемого сегмента. Установлено, что расстояние между восстанавливающими муфтами должно уменьшаться по мере их удаления от передатчика. Начальный уровень мощности накачки достаточно выбирать в пределах 70 мВт. Ограничивать эффективность применения метода может повышенный уровень шума ASE на ВОЛП. Тем не менее метод может представлять интерес для организации высокоскоростной передачи (40 Гбит/с и выше на канал) при невозможности использования сосредоточенных компенсаторов ХД, которые могут вносить интерференционные искажения, а также средств электронной компенсации дисперсии.

В отличие от существующих методов формирования и поддержания КСП на ВОЛП, в рассматриваемом случае обеспечивается возможность не использовать электронные и электрические узлы в зоне расположения ВОЛП. Это может быть интересно с точки зрения упрощения обслуживания линии передачи, например, при труднодоступном расположении оптического кабеля при подвеске его на опорах линий электропередачи или для обеспечения требований пожаро- и взрывобезопасности системы связи на предприятиях.

Предложена конструкция волоконно-оптического интерференционного устройства преобразования параметров оптического сигнала. Действие указанного устройства основано на использовании многолучевой интерференции в двухрезонаторном интерферометре, обладающем существенной избирательностью к спектральным составляющим входного излучения. Предложено также смеситель, являющийся центральной частью устройства, выполнять из материала, легированного редкоземельным элементом, например эрбием, для повышения мощности выходного сигнала.

Выполнена оценка основных конструктивных параметров устройства. Предложено коэффициент отражения зеркал интерферометра, образованного торцами смесителя, выбрать из условия взаимной компенсации передаточной функции ИФП и характеристики усиления легированной среды. Среднее значение длины дополнительных световодов также предложено выбрать исходя из свойств сигнала – при условии минимизации нарушений приема. Проведено моделирование процесса преобразования входного импульса, представленного одной из выбранных супергауссовых форм, в устройстве. Это позволило определить диапазон значений средней длины $l_{к,ср}$ дополнительных световодов.

Предложенное устройство может представлять интерес при построении разветвленных волоконно-оптических сетей с топологической структурой «точка-многоточка», обслуживающих удаленных абонентов. Исследование выполнено при поддержке Минобрнауки РФ, соглашение 14.В37.21.1878.

Литература

1. Nortel – спрос на полосу пропускания // <http://nag.ru/news/newsline/14952/nortelnakonferencii-ofc-nfoec-spros-na-polosu-propuskaniya.html>
2. Тен С., Таури К., Шарма М., Лобанов С. Требования к оптическим волокнам связи с развитием 100 Гбит/с систем передачи // Фотон-экспресс. № 7, 2010. – С. 22-26.
3. Бурдин В.А., Дашков М.В., Волков К.А. Влияние параметров схемы компенсации хроматической дисперсии на работу волоконно-оптической линии передачи // Оптический журнал. № 2, 2011. – С. 80-81.
4. Krishna M.S., Suresh S. Optical WDM networks: principles and practice. Boston: Academic Publishers, 2000. – 354 p.
5. Mukherjee B. Optical Communication Networks. Mc.Graw-Hill, 2005. – 576 p.
6. Agrawal G.P. Nonlinear fiber optics. Boston: Academic Press, 2001. – 466 p.
7. Виноградова И.Л. Задача определения параметров оптимального оптического импульса для линии передачи с интерференционными свойствами // Компьютерная оптика. Т.33, № 2, 2009. – С. 147-155.
8. Ржевский С.П. Интерференционные волоконно-оптические устройства вычислительной техники и систем управления: Дис. к.т.н. Уфа, 1989. – 197 с.
9. Гауэр Дж. Оптические системы связи: Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1989. – 504 с.
10. Рекомендация отрасли ИТУ-Т G.652. Характеристики одномодовых оптических волокон и кабелей. Интернациональное телекоммуникационное общество, 2003. – 45 с.
11. Electronic Dispersion Compensation for 10 Gb/s, 1550nm Optical // <http://www.oif/products/Product.omn=165>
12. Franceschini M., Ferrari G., Raheli R., Bongioni G. Fundamental limits of electronic dispersion compensation in optical communications with direct photodetection // Electronics Letters. Vol. 42, №15, 2006. – P. 115-121.
13. Жирард А. Компоненты системы DWDM: оптические усилители EDFA. EXFO, 2001. – 381 с.
14. Рекомендация отрасли ИТУ-Т G.653. Характеристики одномодовых со сдвигом дисперсии оптических волокон и кабелей. Интернациональное телекоммуникационное общество, 2003. – 45 с.
15. Султанов А.Х., Гайфуллин Р.Р., Виноградова И.Л. Метод контроля состояния «loop» для волоконно-оптической системы связи // Сб. докладов XIII МНТК «Радиолокация, навигация, связь» RLNC`2007. Воронеж, НПФ «Саквеев», 2007. – С. 645-651.

16. Кившарь Ю.С., Агравал Г.П. Оптические солитоны. От волоконных световодов до фотонных кристаллов. Пер. с англ. М.: ФИЗ-МАТЛИТ, 2005. – 648 с.
17. Щеглюк С.В., Шапиро Е.Г., Мезенцев В.К., Турицын С.К. Методы моделирования транспортных оптических сетей // Электросвязь. № 2, 2002. – С. 37-42.
18. Волков К.А. Реконструкция ВОЛП с включением компенсирующих волокон в муфтах оптического кабеля // ИКТ. Т. 8, №1, 2010. – С. 58-61.
19. Султанов А.Х., Усманов Р.Г., Виноградова И.Л. Сегмент системы передачи с усилителем EDFA // Датчики и системы. № 4, 2002. – С. 21-33.
20. Гордиенко В.Н., Тверецкий М.С. Многоканальные телекоммуникационные системы. М.: Горячая линия – Телеком, 2007.– 416 с.
21. Busch K., Lulkes S., Wehrspohn R.B., Fuell H. Photonics Crystals: advances in design, fabrication and characterization. Weinheim: Wiley-VCH, 2004. – 378 p.
22. Рекомендация отрасли ITU-T G.650.2. Определения и методы тестирования для статистических и нелинейных свойств одномодовых оптических волокон и кабелей. Интернациональное телекоммуникационное общество, 2002. – 46 с.
23. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. М.: Компания Сайрус-Системс, 1999.– 670 с.
24. Рекомендация отрасли ITU-T G.694.1. Спектральная решетка для приложений WDM. Частотная решетка DWDM. Интернациональное телекоммуникационное общество, 2002. – 5 с.

THE TASK OF FIBER-OPTICAL SEGMENT FOR HIGH BIT RATE NETWORKING

Vinogradova I.L., Zevig V.G., Kostuk D.S., Kashbiev A.A.,
Sultanov A.H., Turayzanov D.I., Hasanov R.H.

The article is devoted to research of a method, ensuring a soliton mode of link with use of fiber-optical components, carrying out positive chirping in information pulses. The analysis of existing methods based on use of an information signal chirping for indemnification chromatic dispersion by optical means was carried out. The modeling of an optical pulse duration and its chirp functions on an offered segment has allowed to estimate parameters of a segment - distance between restoring pits and level of an additional radiation capacity. Method is interesting for height bit rate (40 GBit/s or more) and do not use electrical or local technique for dispersion compensate.

Keywords: soliton mode of link, nonlinear refraction, phase self-modulation, phase cross-modulation, loss in a fiber, distortion of a digital signal, optical telecom systems.

Виноградова Ирина Леонидовна, д.т.н., профессор Кафедры телекоммуникационных систем (ТС) Уфимского государственного авиационного технического университета (УГАТУ). Тел.: (8-347) 272-43-84; 8-917-458-01-78. E-mail: tks@ugatu.ac.ru.

Зевиг Владимир Георгиевич, к.т.н., преподаватель Кафедры ТС УГАТУ. Тел. 8-917-363-62-84. E-mail: zevigv@list.ru

Кашбиев Айдар Аглямович, технический специалист ОАО «ACTIVE TELECOM». Тел. (8-347) 250-21-51. E-mail: kashbiev@activetelecom.ru

Костюк Денис Сергеевич, соискатель Кафедры ТС УГАТУ. Тел. 8-937-30-99-652. E-mail: deniska29031@yandex.ru

Султанов Альберт Ханович, д.т.н., профессор, заведующий Кафедрой ТС УГАТУ. Тел. (8-347) 273-06-89. E-mail: tks@ugatu.ac.ru

Хасанов Ренат Халитович, соискатель Кафедры ТС УГАТУ. Тел. 8-917-404-05-88. E-mail: rewld@yandex.ru

Турайзянов Дамир Исламнурович, соискатель Кафедры ТС УГАТУ. Тел. 8-919-159-23-27. E-mail: damirezz@mail.ru