

УДК 681.7.068

## Применение chirпированного сигнала для построения адаптивных волоконно-оптических сетей связи

И. Л. Виноградова<sup>1</sup>, А. А. Кашбиев<sup>2</sup>, В. Г. Зевиг<sup>1</sup>,  
Д. С. Костюк<sup>1</sup>, Р. Х. Хасанов<sup>1</sup>, Д. И. Турайзянов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>vinogradovatsk@gmail.ru, <sup>2</sup>kashbiev@activetelecom.ru

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

<sup>2</sup>ООО "ACTIVETelecom"

Поступило в редакцию 22.12.2012

**Аннотация.** Рассматриваются телекоммуникационные задачи, для решения которых может быть использован эффект chirпирования оптических импульсов. Предложено аналитическое выражение, описывающее генерируемый импульс с chirпированными фронтами. Показано, что с привлечением нелинейных оптических эффектов фазовой модуляции может быть реализовано функциональное преобразование вида «форма сигнала – функция chirпа». Приведены примеры некоторых таких схем. Предложена концепция построения пассивной оптической сети, предназначенной для обслуживания удаленных (100...150 км) абонентских сегментов. Показано также, что такая схема позволяет в значительной мере снизить расходы по наращиванию длин сегментов по сравнению с традиционной технологией в данной области.

**Ключевые слова.** Оптическая система передачи; chirпирование; хроматическая дисперсия; фазовая самомодуляция; преобразование оптического сигнала

В развитии телекоммуникационных систем важную роль играет повышение битовой скорости передачи  $B$  и внедрение «интеллектуальной базы» на нижних сетевых уровнях<sup>1</sup>, в том числе – на уровне волоконно-оптической линии передачи (ВОЛП), что означает управление информационным сигналом посредством использования оптических устройств ВОЛП. Последнее особенно актуально при построении высокопроизводительных разветвленных сетей связи, к которым можно отнести сети городского масштаба или Metropolitan Area Networks (MAN). Причем для MAN повышение общего быстродействия «из конца в конец», т. е. того, что отражается на системе качества QoS для пользователя, основано не столько на росте  $B$ , сколько на ускорении процессов управления сигналами [2], что повышает актуальность интеллектуализации ВОЛП и, соответственно, оправдывает поиск новых средств для этого.

А именно – определение дополнительных «независимых координат», задействование которых обеспечит наращивание ресурса управления, а значит, позволяет расширить функциональные возможности сети. Примером может служить фактически уже свершившийся переход на многоволновой характер управления<sup>2</sup> сетью по отношению к одноволновому.

### ВВОДНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Следует отметить, что, во-первых, таких «независимых координат» не так уж много – они вытекают из физических свойств передаваемых сигналов, следовательно, не могут наращиваться неограниченно. Во-вторых, в основном они уже изучены и успешно используются в телекоммуникациях. Поэтому даже небольшое продвижение в данном направлении представляет существенный технический интерес и является актуальным. В частности, применение модуляции типа DQPSK к оптическому сигналу позволило достичь значительного повышения битовой скорости передачи в резуль-

---

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение 14.В37.21.1878.

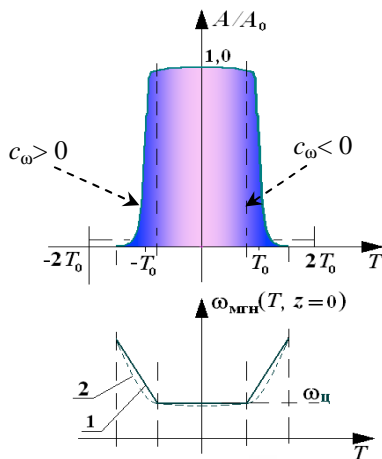
<sup>1</sup> Примером может служить MPLS, позволившая ускорить быстродействие сети за счет снижения уровня выполнения маршрутизации [1].

<sup>2</sup> В данном случае речь идет не об уплотнении каналов по длине волны, а о создании подсетей VPWDM.

тате взаимодействия ортогональных поляризованных составляющих электрической напряженности поля  $E$  световой волны [3–5], т. е. такого параметра, использование которого ранее не представлялось эффективным ввиду его неустойчивости и, соответственно, невозможности его контроля и управления при распространении волны. С этой точки зрения исследование возможностей применения такого параметра, как chirп оптического сигнала, при построении высокоскоростных сетей, к которым относятся современные и перспективные MAN, представляется актуальной технической задачей.

### ФУНКЦИЯ ЧИРПА И ЕЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СРЕДСТВАМИ ВОЛП

Хорошо известно, что оптический импульс, генерируемый в результате амплитудной модуляции тока накачки полупроводникового лазера, содержит chirпированные фронты, на протяжении которых и происходит изменение амплитуды, а значит – смещение центральной длины волны:  $\lambda = \lambda_c + \Delta\lambda$  [см., например, 6], и мгновенной частоты излучения  $\omega_{\text{мгн}}$ . Если  $\lambda$  увеличивается, то chirпирование считается положительным [7, 8], а при уменьшении  $\lambda$  – отрицательным (рис. 1).



**Рис. 1.** Модель оптического импульса-меандра [9] в виде супергауссовой формы (1), содержащего chirпированные фронты: 1 – с линейным изменением  $\omega_{\text{мгн}}$ , соответствующим свойствам реальной физической системы модуляции с полупроводниковым лазером, описанной выше; и 2 – со слабым нелинейным изменением  $\omega_{\text{мгн}}$ , вытекающим из (1)

$$A(0, T) = A_0 \exp\left(-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{2\ell}\right) \times \exp\left(j \frac{c_\omega}{2} \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{2\ell-1} + j\omega_c T\right), \quad (1)$$

где  $A_0$  и  $T_0$  – пиковая амплитуда<sup>3</sup> и параметр, определяющий длительность импульса  $T_{\text{и}}$ ;  $c_\omega$  – параметр chirпирования [7], определяющий величину и направление смещения частоты, (рис. 1),  $T$  – время в системе отсчета, связанной с импульсом [7],  $\ell$  – целочисленный параметр, характеризующий крутизну фронта, и  $\omega_c$  – круговая частота излучения, на которой передается центральная часть импульса.

Кроме параметра chirпирования  $c_\omega$  в ряде случаев следует рассматривать функцию chirпа [10], позволяющую определить, например, наибольшее изменение<sup>4</sup> частоты  $\omega_{\text{мгн}}$  (или  $\lambda_{\text{мгн}}$ ) на протяжении  $T_{\text{и}}$ :

$$C_\omega(z) = -\Delta_T(\omega_{\text{мгн}}(z, T))_0^{T_{\text{и}}}, \quad (2)$$

где  $\Delta_T(\bullet)$  – знак дифференциала от функции по переменной  $T$ ;  $\omega_{\text{мгн}} = \frac{d\Psi(z, T)}{dT}$ ,  $\Psi(z, T)$  – фаза в представлении огибающей оптической мощности  $P(z, T) = P_0 \cdot \text{Mod}(z, T) \cdot e^{j\Psi(z, T)}$ , где  $P_0$  – пиковая мощность импульса. Знак минус используется вследствие того, что направление отсчета  $dT$  физической системы будет противоположно принятому в математике приращению аргумента.

В настоящее время эффект вносимого положительного chirпирования используют на сетях связи для компенсации действия хроматической дисперсии (ХД) [11, 12], вносящей отрицательное chirпирование на протяженных магистралях (100 км и более). Действительно, традиционно эксплуатируемые в России ВОЛП, построенные на оптических волокнах (ОВ) SMF-28, обладают отрицательным характеристическим дисперсионным параметром  $\beta_{2, \text{SMF}} \approx -22 \text{ пс}^2/\text{км}$  (соответственно дисперсионным коэффициентом

<sup>3</sup> Речь идет о «продольной» (вдоль направления распространения  $z$ ) составляющей полной напряженности  $E$  [7]. Предполагается, что «поперечную» составляющую допускается не рассматривать для систем связи с одномодовыми оптоволоконными (ОВ), работающим с прямым фотодетектированием и амплитудно-пороговым решающим устройством [9].

<sup>4</sup> В представлении  $C_\omega$  по (2) считаем, что значения  $\omega_{\text{мгн}}$  наиболее отклонены от  $\omega_c$  на краях импульса, т. е. в точках с координатами  $T = 0$  и  $T = T_{\text{и}}$ .

$D_{ХД} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \cdot \beta_2$  и для SMF-28:  $D_{ХД, SMF-28} \cong \cong 17$  пс/нм·км [13]) в области длин волн магистральной передачи  $\lambda_0 \cong 1550$  нм. И если положить, что изменение  $A(z, T)$  описывается уравнением<sup>5</sup>  $j \frac{\partial A}{\partial z} = \frac{1}{2} \cdot \beta_2 \cdot \frac{\partial^2 A}{\partial T^2}$  [7], где  $j$  – мнимая единица, то с учетом начального условия (1) пусть с  $\ell = 1$  и даже начальным  $c_\omega = 0$  по методике [7] можно записать:  $\Psi_{ХД} = \frac{1}{2} \arctg \frac{\beta_2 z}{T_0^2} - \frac{\beta_2 z}{2(T_0^4 + (\beta_2 z)^2)} \cdot T^2$ , тогда  $\omega_{мгн} = \frac{d\Psi_{ХД}}{dt} = -\frac{\beta_2 z}{T_0^4 + (\beta_2 z)^2} \cdot T$ . Учитывая (2), получа-

ем:  $C_{\omega, ХД}(z) = \frac{4\beta_2 z T_0}{T_0^4 + (\beta_2 z)^2} < 0$ . Введение чирпирования  $C_{\omega, лоп}(z) \cong -|C_{\omega, ХД}(z)|$  позволяет снизить приобретаемый под действием ХД отрицательный чирп, приводящий к взаимному разбеганию «синих» и «красных» спектральных составляющих импульса в пределах  $\Delta\lambda$ , а с этим – и вносимое ХД уширение импульса во временной области. Если в (1)  $c_\omega \neq 0$ , то  $C_{\omega, ХД}(z)$  приобретает более сложный вид, зависящий от  $c_\omega$ .

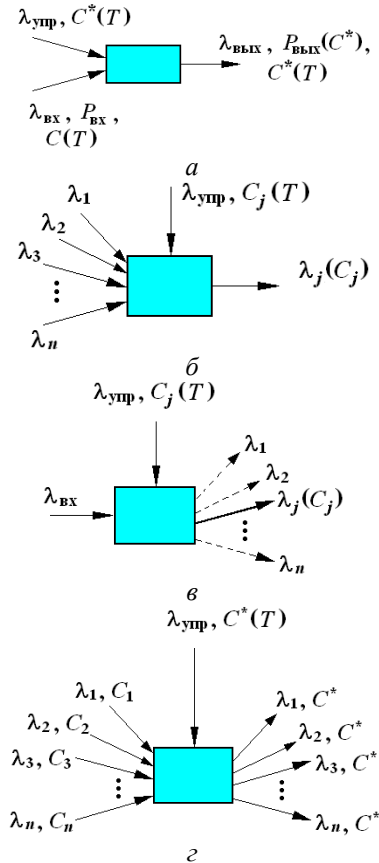
Но управление чирпированием может применяться и для реализации функций управления сигналами на разветвленных сетях. Так, например, использование таких эффектов, как фазовая само- (ФСМ) и кросс-модуляция (ФКМ) позволяет фактически выполнить преобразование вида: огибающая оптической мощности (т. е. форма сигнала)  $\leftrightarrow$  функция чирпа при соответственном задании формы входного сигнала. Согласно [7], действие ФСМ на продольную составляющую  $A(z, T)$  описывается уравнением  $\frac{\partial A}{\partial z} = j\gamma P_0 \cdot |A|^2 \cdot A$ , где  $\gamma$  – коэффициент нелинейности.

Полагая малое снижение амплитуды сигнала в компонентах преобразования, которые можно реализовать для выполнения функций управления (рис. 2), и используя, соответственно, решение для  $A(z, T)$  в виде:

$$A(z, T) \cong A(0, T) \cdot \exp(j\gamma P_0 |A(0, T)|^2 \cdot z),$$

получаем, что  $\Psi_{ФСМ} \cong \gamma P_0 |A(0, T)|^2 \cdot z$ , а с этим с учетом (2):

$$C_\omega(z) = -2\gamma P_0 \cdot \left[ \left| \frac{dA(0, T)}{dT} \right| \cdot \frac{dA(0, T)}{dT} + |A(0, T)| \cdot \frac{d^2 A(0, T)}{dT^2} \right] \cdot \Delta T \cdot z.$$



**Рис. 2.** Схемы функционального преобразования «форма сигнала  $\leftrightarrow$  функция чирпа»: *a* – приобретение заданного чирпа  $C^*$  и/или уровня мощности, зависящего от чирпа, возможно, совместно заданного чирпа и уровня мощности, зависящего от чирпа; *б* – выбор длины волны  $\lambda_j$  из заданного набора, соответствующей  $j$ -й функции чирпирования  $C_j$ ; *в* – преобразование  $\lambda_{вх}/\lambda_j$  в зависимости от  $C_j$ ; *г* – функция «копирования чирпа», передаваемого всем длинам волн от управляющего сигнала (предполагается, что на входе присутствуют сигналы с произвольным чирпированием)

Чтобы набрать требуемую длину  $z^*$  для получения заданной функции чирпа  $C_\omega(z^*)$  следует нелинейный элемент<sup>6</sup>, выполняющий ФСМ и/

<sup>5</sup> Без учета километрического затухания, дБ/км.

<sup>6</sup> В качестве указанного элемента возможно использовать микроструктурные волокна [14] со значениями  $\gamma = 100 (\text{м} \cdot \text{В}^2)^{-1}$  и более, либо специализированные

или ФКМ преобразование поместить, например, в многопроходной интерферометр, роль которого может выполнять волоконно-оптическая петля с односторонним ответвлением [16] или многолучевой интерферометр типа Фабри–Перо.

В общем случае такие схемы могут быть как реляционными (с применением дополнительного управляющего воздействия) [17], так и нереляционными с управлением, «заложеным» в свойствах передаваемого сигнала.

Следует особенно подчеркнуть, что использование рассматриваемого оптического параметра основано на оптических эффектах и оптико-оптических взаимодействиях, следовательно, является перспективным с точки зрения реализации концепции полностью оптических сетей или AllOpticalNetworks [17].

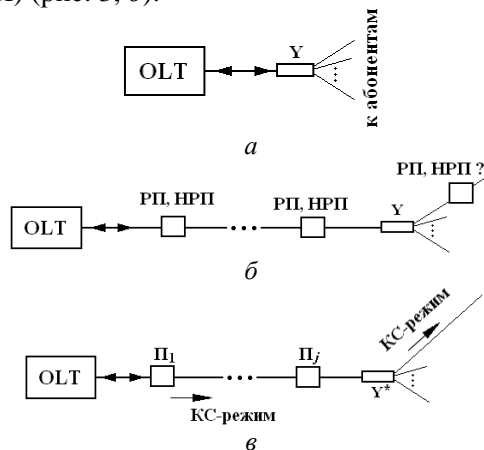
### ПОСТРОЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ДЛЯ УДАЛЕННЫХ АБОНЕНТСКИХ СЕКМЕНТОВ

Применение chirпирования на сетях связи в настоящее время пока ограничивается, как упоминалось выше, задачей компенсации действия ХД для магистральной передачи. Но категория сетей MAN уже сегодня характеризуется высокими битовыми скоростями (от 10 Гбит/с) и протяженными ВОЛП (100...150 км), особенно если учитывать пригородную (вокруг мегаполисов) частную застройку. Это приводит к необходимости модернизировать схемы построения MAN, безусловно, учитывая их характерные черты и особенности. Примером может служить развивающаяся тенденция модернизации классических сетей PON (PassiveOpticalNetworks), именуемая как «RadioandFiber» [18], согласно которой по волокну передаются два  $\lambda$ -канала на близких длинах волн, отличающихся как раз на ту радиочастоту, которая и выделяется в точке доступа средствами линии без привлечения традиционной аппаратуры преобразования сигналов и решающих схем. Указанный принцип позволяет упростить каналный тракт, чем и является привлекательным для операторов.

В нашем случае в отношении использования chirпа оптического сигнала рассмотрим возможность применения PON для удаленных абонентских сегментов с дистанцией в 100...150 км фидерного ОВ в сравнении с традиционными PON, обслуживающими 10...15-километровые по диаметру сети [1] области. Обозначим для определенности такие сети как PON-long.

материалы с высокой степенью нелинейности, например, см. [15].

Чтобы адаптировать PON, строящуюся по схеме (рис. 3, а), для поставленной задачи потребуется на протяженном сегменте ВОЛП использовать регенерационные пункты (РП), которые в лучшем случае могут быть необслуживаемыми (НРП) (рис. 3, б).



**Рис. 3.** Схемы волоконно-оптических сетей категории MAN: а – PON, традиционно обслуживающие городские сегменты; б – PON для удаленных абонентских сегментов; в – схема PON-long: OLT – оборудование линейного тракта; Y – Y-разветвитель типа  $1 \times N$ ; Y\* – устройство преобразования сигналов с функцией разветвителя, обеспечивающее в общем случае коррекцию функции chirпа оптического сигнала [см., например, 19]; Pi, ..., Pj – устройства преобразования функции chirпа (см. далее) и КС-режим – квазисолитоновый режим передачи [11], характерной особенностью которого является использование chirпирования оптического излучения

С учетом применяемой в настоящее время битовой скорости  $B \geq 10$  Гбит/с на сегментах MAN, а также дисперсионных свойств ОВ<sup>7</sup>, находящихся в эксплуатации, пунктов регенера-

<sup>7</sup> Следует учитывать, что в большинстве случаев эксплуатируются оптические кабели (ОК), проложенные ~ 10 ... 12 лет назад, вносящие существенные дисперсионные искажения, включая поляризационно-модовую дисперсию, срок службы которых еще далек до завершения. Использование новых типов ОВ в России, таких как NZDSF, не превышает 20...25 %, а по отдельным регионам может и вовсе не осуществляться [20, 21]. Известно также, что стоимость ввода в эксплуатацию нового ОК в последнее время существенно выросла, «львиную долю» в которой занимает неуклонно растущая стоимость работ по отводу земель и согласованиям. Последняя сегодня уже превышает стоимость самого ОК и строительного-монтажных работ, связанных с его прокладкой и инсталляцией.

ции на протяженных участках может быть несколько. Выполним оценку стоимости наращивания длины оптоволоконного сегмента, в определенной мере влияющей и на стоимость подключения абонентов.

Известно [9], что под действием ХД происходит уширение длительности импульса меандрового типа приблизительно на величину  $\tau = D_{\text{хд}} \cdot \Delta\lambda \cdot L$ , а для обеспечения допустимого уровня искажений, связанных с нарушением длительности тактового интервала, необходимо  $\tau \leq 0,1 \cdot T_{\text{и}}$ . Учитывая, что  $B \approx \frac{1}{T_{\text{и}}}$ , получаем со-

отношение для граничной длины ВОЛП  $L_0$ , увеличение сегмента свыше которой потребует введение дополнительного пункта РП:

$$B \cdot L_0 \cong \frac{0,1}{D_{\text{хд}} \cdot \Delta\lambda}. \quad (3)$$

Представляет интерес рассмотрение не величины  $L$  отдельно, а произведения  $B \cdot L$ , чего и будем придерживаться далее.

При желании увеличить длину сегмента по традиционной технологии (рис. 3, б), необходимо установить на ВОЛП дополнительный регенерационный пункт, получив в конечном итоге общее их количество  $k_{\text{РП}}$  на  $L$ , или  $L \cong k_{\text{РП}} \cdot L_0$ . Учитывая, что стоимость линейных сооружений системы связи  $\rho$  пропорциональна  $k_{\text{РП}}$ , что означает:  $\rho_1 \cong k_{\text{РП}} \cdot \rho_{\text{РП}}$  (в рамках настоящей оценки не учитывается стоимость непосредственно оптического кабеля и его прокладки, так как это является одинаковой частью как для PON, так и для PON-long; учитывается только цена одного РП:  $\rho_{\text{РП}}$ ), в соответствии с (3) можно записать:  $B \cdot L = k_{\text{РП}} \cdot \frac{0,1}{D_{\text{хд}} \cdot \Delta\lambda}$ , откуда, выразив  $k_{\text{РП}}$  через  $BL$ , получаем:

$$\rho_1 \cong 10D_{\text{хд}} \cdot \Delta\lambda \cdot BL \cdot \rho_{\text{РП}} + \rho_{\text{нач},1}. \quad (4)$$

Величина  $\rho_{\text{нач},1}$  определяется стоимостью типового узлового оборудования по схеме (рис. 3, а), без использования РП или НРП.

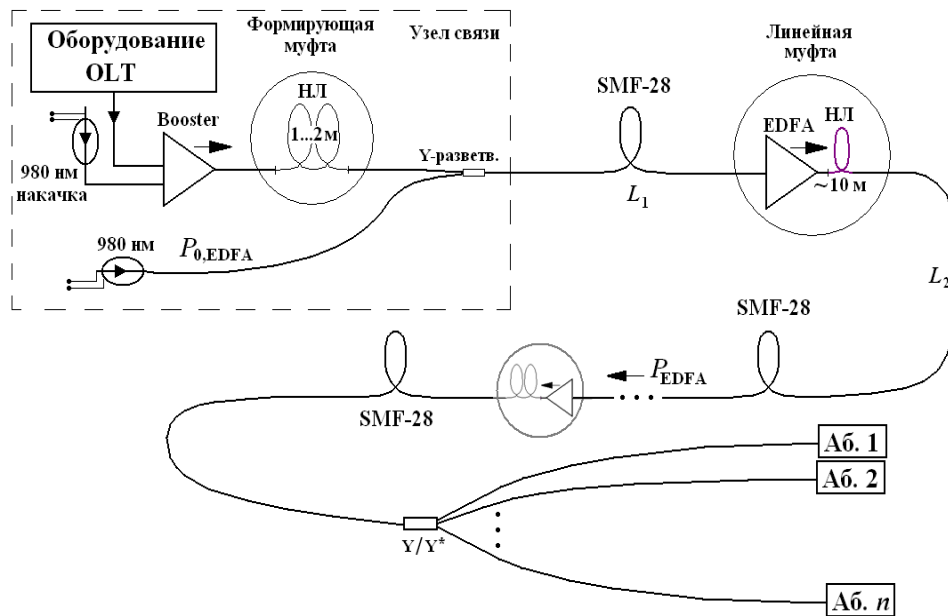
Построение сегмента по схеме (рис. 3, в), предполагает, что действие ХД, приводящее к появлению нежелательного отрицательного чирпа, а затем – и к уширению импульса (при дальнейшем уходе вперед «синих» и отставании «красных» составляющих), будет скомпенсировано введением начального положительного чирпирования, а также поддержания его на ВОЛП. Так как традиционно генерируемый импульс обладает симметричным чирпом, (рис. 1),

что связано с симметрично протекающими процессами при увеличении и снижении тока накачки полупроводникового лазера, требующийся положительный чирп необходимо формировать дополнительно. Для этого, например, можно использовать бустер на выходе оборудования OLT, а при необходимости – дополнительно к нему – специализированное ОВ с высоким  $\gamma$ , обозначено НЛ на рис. 4.

На линии также необходимо использовать специализированные средства для поддержания положительного характера чирпирования, в качестве которых может быть использовано ОВ типа EDFA [9, 17] и ОВ НЛ (при необходимости). Размещение указанных типов волокон целесообразно производить внутри линейных муфт (рис. 4) в виде врезок в магистральное ОВ SMF-28. Причем для того, чтобы обеспечить полностью оптический режим передачи без использования электронных и электрических средств в зоне расположения ВОЛП, накачку EDFA в линейных муфтах можно производить дистанционно, передавая излучение на длине волны 980 нм совместно с информационным излучением 1550 нм. В [22] показано, что при  $L_1, L_2 \dots \leq 10$  км такая совместная передача допустима с точки зрения обеспечения правильности приема в соответствии с действующими QoS-стандартами. Понятие пассивности для такой оптической сети связано с отсутствием активных (управляемых) переключающих устройств. Если в рамках выполняемой стоимостной оценки допустить справедливость применения соотношения (3) для КС-режима<sup>8</sup> и учесть, что наращивание параметра  $BL$  производится эффективным снижением дисперсионного коэффициента  $D_{\text{хд}}$  линии на величину  $D^*$ , зависящую от количества  $k_{\text{П}}$  (см. обозначения на рис. 3, в) и состава указанных выше специализированных муфт, то:

$$B \cdot L = \frac{0,1}{(D_{\text{хд}} - D^*(k_{\text{П}}, \mu)) \cdot \Delta\lambda}, \quad (5)$$

<sup>8</sup> Строго говоря, динамика чирпированного оптического импульса описывается более сложными соотношениями, чем (3) [7]. Более того, в [23] показано, что для выполнения инструментального контроля  $D_{\text{хд}}$  для битовых скоростей свыше 10 Гбит/с недостаточно традиционной экспериментальной базы, например анализатора ФТВ-5800, а требуется использование пересчитывающих алгоритмов, учитывающие статистические свойства сигнала. Тем не менее, для выполняемой оценки, чтобы качественно выполнить сравнение рассматриваемых сетей, будем считать применение (3) допустимым.



**Рис. 4.** Схема построения сегмента для PON-long. Если одна из линий после Y-разветвителя до абонента является достаточно длинной, то это может оправдывать применение КС-режима и на абонентском подключении

В (5)  $\mu$  – ценовая характеристика, связанная с составом муфт. Так, вариация  $D^*$  может достигаться изменением  $k_{\Pi}$  и/или  $\mu$ , и в первом приближении можно допустить, что  $D^* \approx k_{\Pi} \cdot \mu$ .

Пусть  $\rho_{\Pi}^*$  – усредненный стоимостной показатель устройства  $\Pi$  на ВОЛП (рис. 3, в) с учетом некоторого среднего его состава, тогда общая стоимость в рассматриваемом случае может быть представлена как  $\rho_2 = k_{\Pi} \cdot \mu \cdot \rho_{\Pi}^*$  или  $\rho_2 \approx \rho_{\Pi}^* \cdot D^*$ , а учитывая (5), получаем:

$$\rho_2 = \rho_{\Pi}^* \left( D_{\text{ХД}} - \frac{0,1}{\Delta\lambda \cdot BL} \right) + \rho_{\text{нач},2} \quad (6)$$

В области актуальных значений  $BL$  характер зависимости  $\rho_2(BL)$  принимает асимптотический вид, стремящийся к величине  $\tilde{\rho}_2 = \rho_{\Pi}^* \cdot D_{\text{ХД}} + \rho_{\text{нач},2}$ , (рис. 5). Это говорит о лучшей с принципиальной точки зрения технико-экономической эффективности применения сетей PON-long для рассматриваемой задачи по отношению к классической методике построения протяженных ВОЛП, и основанных на ней PON.

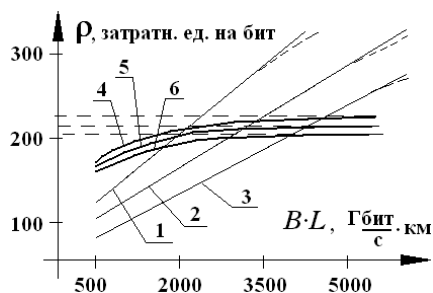
В (4)–(6) предполагается, что  $\Delta\lambda$  одинакова для обоих случаев. Это является справедливым, так как chirпирование приводит не к уширению спектра излучения, а к перераспределению спектральных компонентов на протяжении длительности  $T_{\text{и}}$ . Хотя следует признать, что разви-

тие систем связи с КС-режимом потребует, возможно, начального chirпирования, задаваемого лазером, что неизбежно приведет к усложнению, а значит – удорожанию светоизлучающего аппаратного блока.

Сравнение характера изменения величин  $\rho_1$  и  $\rho_2$  по (4) и (6) соответственно показывает, что протяженные оптоволоконные сегменты, работающие со скоростями 10 Гбит/с и выше целесообразно строить на основе КС-режима передачи. Хотя для классической технологии построения протяженных ВОЛП стартовая цена несколько ниже, но с увеличением  $BL$  растет линейно из-за способа наращивания длины – за счет добавления участка РП и участка  $L_0$  за ним. В PON-long наращивание  $BL$  обеспечивается как путем добавления новых муфт, так и изменением их состава и/или режима обслуживания – уровня мощности накачки  $EDFA P_{0,EDFA}$  (рис. 4), т. е. можно сказать – за счет взаимосвязанного подавления действия ХД. К тому же, муфты являются заведомо необслуживаемыми «регенерационными пунктами», следовательно, дешевле классического РП.

Негативным с экономической точки зрения моментом является вопрос подключения удаленного абонента за Y-разветвителем (рис. 3, б). Очевидно, что размещение РП ради одного подключения вряд ли окажется экономически приемлемым. Кроме того, зависимости 1 – 3 на рис. 5 демонстрируют большой разбег по стои-

мости для различных дисперсионных свойств ВОЛП, так как определяются в конечном итоге количеством РП. Хотя следует отметить, что с увеличением количества приобретаемого оборудования неизбежно снижается их отпускная цена, что и обозначено на рис. 5 отклоняющимися от 1 – 3 пунктирными линиями.



**Рис. 5.** Иллюстрация ценового показателя, характеризующего стоимость увеличения битовой скорости в сети и протяженности сегментов: кривые 1, 2 и 3 построены для  $\rho_1$  и 4, 5 и 6 – для  $\rho_2$ ; 1 и 4 – для  $D_{\text{ХД}} = 23$  пс/нм·км; 2 и 5 – для  $D_{\text{ХД}} = 18$  пс/нм·км; 3 и 6 – для  $D_{\text{ХД}} = 15$  пс/нм·км;  $\Delta\lambda$  везде составляла 0,02 нм

Стартовая цена PON-long является несколько больше за счет использования таких элементов, как дополнительные ОВ EDFA, лазеры накачки для них; оптоволокна с высокой степенью нелинейности и, возможно, специализированное устройство  $Y^*$ . Но для различных  $D_{\text{ХД}}$  разбег в цене получается меньшим, так как для компенсации большей дисперсии можно просто увеличить величину  $P_{0,\text{EDFA}}$  или применить другой тип/длину НЛ ОВ, что в незначительной мере окажет влияние на стоимость. Принципиальным в случае применения PON-long является то, что модернизируется линейная (оптическая) часть сети, а узловое оборудование OLT не затрагивается.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена концепция построения пассивной оптической сети, предназначенной для обслуживания удаленных (100...150 км) абонентских сегментов.

На основании выполненной сравнительной оценки стоимости наращивания битовой скорости и протяженности сегментов для ВОЛП, строящихся по традиционной технологии, и линий с квазисолитоновым режимом передачи показано, что предлагаемая схема представляется эффективнее уже для  $B \cdot L \approx 3000$  Гбит/с·км, а для значения того же параметра свыше

5000 Гбит/с × км применение квазисолитонного режима оказывается эффективнее в  $1,2 \div 1,5$  раза. Более того, в области значений  $B \cdot L \approx 3500$  Гбит/с × км (в зависимости от дисперсионного коэффициента линии) наращивание исследуемого ресурса сети практически может быть реализовано без существенных дополнительных затрат, что безусловно представляет интерес для подключения удаленных абонентов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдштейн А. Б., Гольдштейн Б. С. Технология и протоколы MPLS. СПб.: БХВ – Санкт-Петербург, 2005. 304 с.
2. Перспективы развития сети Интернет // [Электронный документ]. – Режим доступа <http://infopud.ucoz.ru/publ/5-1-0-38> (дата обращения: 29.08.2012).
3. Меккель А. М. Коммутация в оптических транспортных сетях // Фотон-экспресс. 2010. № 7. С. 28–33.
4. Can 100Gb/s wavelengths be deployed using 10Gb/s engineering rules? / R. Saunders [et al.] [Электронный документ]. Режим доступа <http://www.oclaro.com/> (дата обращения: 29.08.2012).
5. Nortel: Solving the 100Gbps transmission challenge. [Электронный документ]. Режим доступа <http://www.exfo.com/en/ExpertiseHub/MultimediaView.aspx?Id= B1&Vid= 14> (дата обращения: 29.08.2012).
6. Гауэр Дж. Оптические системы связи. М.: Радио и связь, 1989. 504 с.
7. Agrawal G. P. Nonlinear fiber optics. Boston: Academic Press, 2001. 466 p.
8. Кившарь Ю. С., Агравал Г. П. Оптические солитоны. От волоконных световодов до фотонных кристаллов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 648 с.
9. Гордиенко В. Н., Тверецкий М. С. Многоканальные телекоммуникационные системы. М.: Горячая линия-Телеком, 2007. 416 с.
10. Виноградова И. Л. Задача определения параметров оптимального оптического импульса для линии передачи с интерференционными свойствами // Компьютерная оптика. 2009. Т. 33, № 2. С. 147–155.
11. Бурдин В. А., Дашков М. В., Волков К. А. Влияние параметров схемы компенсации хроматической дисперсии на работу волоконно-оптической линии передачи // Оптический журнал. 2011. № 2. С. 80–81.
12. Волков К. А. Реконструкция ВОЛП с включением компенсирующих волокон в муфтах оптического кабеля // Инфокоммуникационные технологии. 2010. Т. 8, № 1. С. 58–61.
13. Рекомендация отрасли ITU-TG.709/Y.1331. Оптические интерфейсы транспортной сети OTN. Международное телекоммуникационное общество. 2009. 15 с.
14. Broeng J. A., Bjarklev A. S. Photonic crystal fibers. Kluwer: Academic Publishers, 2003. 266 p.
15. Султанов А. Х., Виноградова И. Л., Салихов А. И. Исследование нелинейного режима преломления для наноструктурного ситалла // Нелинейный мир. 2009. № 5. С. 360–369.
16. Виноградова И. Л., Конохова В. М. Задача нахождения конструктивных параметров синхронизатора, обеспечивающих его функционирование в цифровой сис-

теме передачи // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: Сб. докл. 10-й международн. научн.-техн. конф. Самара: ПГУТИ, 2009. С. 54–57.

17. **Mukherjee B.** Optical Communication Networks. Mc. Graw-Hill, 2005. 576 p.

18. Подход к реализации модуляционного метода при обеспечении коэффициентов оптического фильтра сигналов радио диапазона / Г. А. Морозов [и др.] // T-Comm (Телекоммуникации и транспорт). 2011. № 8. С. 68–73.

19. А.с. СССР № 1697035, МКИ<sub>5</sub>G 02 В 6/28. Волоконно-оптический разветвитель / Р. А. Тухватуллин [и др.]. Оpubл. БИ № 45. 1991.

20. Подход к комплексному анализу работоспособности первичной сети на физическом уровне / Ш. Б. Янышев [и др.] // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: сб. докл. 11-й международн. научн.-техн. конф. Уфа: УГАТУ, 2010. С. 24–30.

21. **Султанов А. Х., Виноградова И. Л., Янышев Ш. Б.** Опыт апробации и ввода в эксплуатацию каналообразующего оборудования со скоростью передачи 10 Гбит/с на эксплуатирующихся линиях ОАО «Башинформсвязь» // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: Сб. докл. 8-й международн. научн.-техн. конф. Уфа: УГАТУ, 2007. С. 106–111.

22. Стыковка разнотипных волокон при дистанционной доставке сигнала накачки EDFA-усилителя / А. Х. Султанов, И. Л. Виноградова, А. И. Салихов // Инфокоммуникационные технологии. 2006. № 2. С. 38–42.

23. **Султанов А. Х., Виноградова И. Л., Янышев Ш. Б.** Влияние хроматической дисперсии световодов на сигналы и связанные с этим ошибки считывания // Электросвязь. 2012. № 1. С. 59–62.

## ОБ АВТОРАХ

**Виноградова Ирина Леонидовна**, профессор каф. телекоммуникационных систем, д-р техн. наук, доцент. Иссл. в обл. волоконной оптики, устройств и систем телекоммуникаций.

**Кашбиев Айдар Аглямич**, техн. специалист ОАО «ACTIVE TELECOM». Дипл. инженер по телекоммуникациям (УГАТУ, 2003). Иссл. в обл. волоконно-оптической связи и мультисервисных систем телекоммуникаций.

**Зевиг Владимир Георгиевич**, преп. каф. телекоммуникационных систем. Дипл. инженер по телекоммуникациям (УГАТУ, 2005). Канд. техн. наук (2010). Иссл. в обл. волоконно-оптической связи и мультисервисных систем телекоммуникаций.

**Костюк Денис Сергеевич**, соиск. той же каф. Дипл. инженер по телекоммуникациям (УГАТУ, 2006). Иссл. в обл. волоконно-оптической связи и мультисервисных систем телекоммуникаций.

**Хасанов Ренат Халитович**, соиск. той же каф. Дипл. инженер по телекоммуникациям (УГАТУ, 2012). Иссл. в обл. волоконно-оптической связи и мультисервисных систем телекоммуникаций.

**Турайзянов Дамир Исламнурович**, соиск. той же каф. Дипл. инженер по телекоммуникациям (УГАТУ, 2012). Иссл. в обл. волоконно-оптической связи и мультисервисных систем телекоммуникаций.

## METADATA

**Title:** Application of a chirped signal for construction of adaptive fiber-optical networks.

**Authors:** I. L. Vinogradova<sup>1</sup>, A. A. Kashbiev<sup>2</sup>, V. G. Zevig<sup>1</sup>, D. S. Kostuk<sup>1</sup>, R. H. Hasanov<sup>1</sup>, D. I. Turayzanov<sup>1</sup>

**Affiliation:**

<sup>1</sup> Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

<sup>2</sup> JSC “ACTIVE TELECOM”, Russia.

**Email:** <sup>2</sup>[aks@ugatu.ac.ru](mailto:aks@ugatu.ac.ru)

**Langage:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (Scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), 2013, Vol. 17, No. 2 (55), pp. 20–28. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** In the article the telecommunication tasks are considered, for which decision the chirp effect of optical pulses can be used. The analytical expression describing a pulse, generated by the semi-conductor laser, with chirped fronts is offered. It is shown, that with attraction of nonlinear optical effects of phase modulation the functional transformation of a kind «the form of a signal – chirp function» can be realized. The examples of some such circuits are given. The concept of a passive optical network intended for service long (is offered 100... 150 kms) user's segments. It is shown also, that such circuit allows largely to lower the charges on escalating lengths of segments in comparison with traditional technology in the given area.

**Key words:** Optical transfer systems, chirp of signal radiation, chromatic dispersion, self-phase modulation, transformation of an optical signal.

**References (English Transliteration):**

1. Goldshtein A. B., Goldshtein B. S. *Technology and protocols MPLS*. S. Peterburg Press, 2005. 304 p. (In Russian).
2. *Perspective of Internet*. URL: <http://infopud.ucoz.ru/publ/5-1-0-38> (date 29.08.2012).
3. Mekkel A. M. “Switching in optical transport networks”, in *Photon express*, 2010, No. 7. P. 28–33. (In Russian).
4. Saunders R., Nicholl G., Wollenweber K., Schmidt T. Can 100Gb/s wavelengths be deployed using 10Gb/s engineering rules? URL: <http://www.oclaro.com/> (date 29.08.2012).
5. *Nortel: Solving the 100Gbps transmission challenge*. URL: <http://www.exfo.com/en/ExpertiseHub/Multimedia> View. asp?Id=B1&Vid=14 (date 29.08.2012).
6. Gauer J. *Optical Systems of communication*. Radio and communication Press, 1989. 504 p. (In Russian).
7. Agrawal G. P. *Nonlinear fiber optics*. Boston: Academic Press, 2001. 466 p. (In English).
8. Kivshar Y. S., Agrawal G. P. *Optical solitons*. Fizmatlit Press, 2005. 648 p. (In Russian).
9. Gordienko V. N. *Multichannel communications*. Goriachaia Linia Press, 2007. 416 p. (In Russian).
10. Vinogradova I. L. “The task of optical pulse parameters researching for connection line with interference property”, in *Computer Optics*, 2009, Vol. 33, No. 2. P. 147–155. (In Russian).
11. Burdin V. A., Dashkov M. V., Volkov K. A. “The parameters of dispersion compensate scheme influence on a fiber optical line working”, in *Optical Journal*, 2011, No. 2. P. 80–81. (In Russian).
12. Volkov K. A. “Reconstruction of fiber optical line with using compensate fibers”, in *Infocommunication technology*, 2010, Vol. 8, No. 1. P. 58–61. (In Russian).



13. ITU-T G.709/Y.1331. Optical Interfaces of OTN.2009. P. 15. (In English).
14. Broeng J. A., Bjarklev A. S. Photonic crystal fibers. – Kluwer: Academic Publishers, 2003. 266 p. (In English).
15. Sultanov A. H., Vinogradova I. L., Salihov A. I. “The researching of nonlinear refraction mode for nanostructure sital”, in *Nonlinear World*, 2009, No. 5. P. 360–369. (In Russian).
16. Vinogradova I. L., Konuhova V. M. *The task of researching of constructive parameters synchronizator*, Doclad of Conference, 2009. P. 54–57. (In Russian).
17. Mukherjee B. Optical Communication Networks. Mc.Graw-Hill, 2005. 576 p. (In English).
18. Morozov G. A., Morozov O. G., Sadeev T. S., Aibatov D. L. Research of realization for modulation method for optical filters, in *T-Comm*, 2011, No. 8. P. 68–73. (In Russian).
19. Tuhvatullin R. A., Vinogradova L. E., Rzevsky S. P., Vinogradova I. L. “Fiber optical splitter”, Patent № 1697035, 1991. P. 45. (In Russian).
20. Yanishev Sh. B., Galeev I. H., Sultanov A. H., Garifinov A. N., Vinogradova I. L., Salihov A. I. *Research of complex analysis of working networks on physical layer*, Doclad of Conference, 2010. P. 24–30. (In Russian).
21. Sultanov A. H., Vinogradova I. L., Yanishev Sh. B. *Experience of using 10 GBit/sec technical for Russian communications*, Doclad of Conference, 2007. P. 106–111. (In Russian).
22. Sultanov A. H., Vinogradova I. L., Salihov A. I. “Connection of variety fibers for distance pump EDFA”, in *Infocommunication technology*, 2006, No. 2. P. 38–42. (In Russian).
23. Sultanov A. H., Vinogradova I. L., Yanishev Sh. B. Influence of chromatic dispersion of fibers on varieties’ signals, in *Electrosvaz*, 2012, No. 1. P. 59–62. (In Russian).

**About authors:**

1. Vinogradova, Irina Leonidovna, Prof., Dept. of Telecommunication Systems. Dipl. Radioelectron. (Ufa State Inst., 1991). Cand. of Tech. Sci. (UGATU, 2000), Dr. of Tech. Sci. (UGATU, 2010).
2. Kashbiev, Aydar Aglamovich, (PhD) Student, Dept. of Telecommunication Systems. Master of Technics & Technology (UGATU, 2003).
3. Zevig, Vladimir Georgievich, (PhD) Student, Dept. of Telecommunication Systems. Master of Technics & Technology (UGATU, 2005).
4. Kostuk, Denis Sergeevich, (PhD) Student, Dept. of Telecommunication Systems. Master of Technics & Technology (UGATU, 2006).
5. Hasanov, Renat Halitovich, (PhD) Student, Dept. of Telecommunication Systems. Master of Technics & Technology (UGATU, 2012).
6. Turayzanov, Damir Islamnurovich, (PhD) Student, Dept. of Telecommunication Systems. Master of Technics & Technology (UGATU, 2012).