

References

1. Kleinrock L. *Queueing computer systems*, 1976, vol. 2. 576 p. (Russ. ed. Klejnrok L. Vychisli-tel'nye sistemy s ocheredjami. Moscow, Mir Publ., 1979. 600 p.).
2. Sheluhin O.I., Tenyakshev A.M., Osin A.V. *Fraktal'nye processy v telekommunikacijah* [Fractal processes in telecommunications]. Moscow, Radio engineering Publ., 2003. 480 p.
3. Stepanov S.N. *Teorija teletrafika. Konceptii, modeli, prilozhenija* [Teletraffic theory. Concepts, models, applications]. Moscow, Goryachaya liniya-Telecom Publ., 2015. 808 p.
4. Likhtsinder B.Y. Interval'nyj metod analiza trafika mul'tiservisnyh setej [Interval method of traf-fic analysis in multiservice communication systems]. *Prilozhenie k zhurnalu «Infokommunikacionnye tehnologii»*, 2011, pp. 104-152.
5. Likhtsinder B.Y. *Interval'nyj metod analiza trafika mul'tiservisnyh setej dostupa* [Interval method of traffic analysis in multiservice access networks]. Samara, PGUTI Publ., 2015. 121 p.
6. Blatov I.A., Likhtsinder B.Y. Ob ocenke dlin ocheredej v SMO s proizvol'noj korrelyaciej [Esti-mating the queue lengths in QS with arbitrary correlation]. *Information Technologies and Nanotechnologies (ITNT-2018)*, April 24-27, 2018.
7. Zheng F.U., Wang J. A new method for the Pollaczek-Khinchin formula. *ICIC express letters. Part B, Applications: an international journal of research and surveys*, 2015, vol. 6, pp. 1619-1624.
8. Huang L., Lee T.T. Generalized Pollaczek-Khinchin formula for markov channels. *Communications, IEEE Transactions on*, 2013, vol. 61, no. 8, pp. 3530-3540. doi: 10.1109/TCOMM.2013.061913.120712
9. Huang L. *Generalized Pollaczek-Khinchin Formula for Queueing Systems with Markov Modulated Services Rates: diss.* The Chinese University of Hong Kong, 2013.

Received 11.05.2018

ТЕХНОЛОГИИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

УДК 621.391.63

УПРАВЛЕНИЕ ВРЕМЯ-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ ОПТИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА В СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ RADIO-OVER-FIBER С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДУЛЯТОРА МАХА-ЦЕНДЕРА

Воронкова А.В., Воронков Г.С., Янтилина Л.З., Султанов А.Х., Виноградова И.Л.
Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, РФ
E-mail: annette210590@gmail.com

Статья посвящена исследованию возможности увеличения пропускной способности каналов волоконно-оптических линий связи, работающих по технологии Radio-over-Fiber. Предложено использовать в качестве переносчика информации время-частотную характеристику (чирп) электромагнитных импульсов. Приведены методы управления время-частотной характеристикой оптического импульса в системах Radio-over-Fiber. Предложен принцип управления чирпом за счет изменения управляющего напряжения модулятора Маха-Цендера. Получены формулы, связывающие функцию чирпа оптического импульса с законом изменения напряжения на управляющем входе модулятора. Описан эксперимент, позволяющий проверить возможность управления чирпом сигнала с помощью модулятора Маха-Цендера, в качестве управляющего сигнала для которого использован генератор пилообразного напряжения. Результаты эксперимента близки к результатам имитационного моделирования, что свидетельствует о возможности управления чирпом оптического сигнала предложенным способом. Описана возможность использования чирпированных сигналов для обеспечения связи между контроллерами-менеджерами сетей SDN без снижения пропускной способности основного канала связи.

Ключевые слова: Radio-over-Fiber, полностью оптическая сеть, управление разветвленной сетью, чирп оптического импульса, модулятор Маха-Цендера

Введение

На сегодняшний день в развитии телекоммуникационных систем главную роль играет увеличение скорости передачи данных, необходимое

для расширения спектра предоставляемых услуг и повышения их качества. Одновременно на передний план выходят вопросы разработки новых, более быстродействующих способов управления

трафиком. В первую очередь описанные тенденции характерны для участков «последней мили», хотя разработка новых способов маршрутизации также важна и в магистральных сетях, и при построении высокопроизводительных разветвленных сетей связи, например, сетей городского масштаба (Metropolitan Area Networks, MAN) и пассивных оптических сетей (Passive Optical Networks, PON). Причем для MAN и PON повышение общего быстродействия, определяющего в конечном счете QoS для пользователя степень его удовлетворенностью услугой, определяется не столько ростом битовой скорости, сколько ускорением процессов управления сигналами [2]. Указанный момент повышает актуальность исследований в области интеллектуальных волоконно-оптических сетей и обуславливает поиск новых способов управления потоками данных на нижних сетевых уровнях. Это означает управление информационным сигналом посредством использования оптических устройств волоконно-оптической линии передачи (ВОЛП). Особую актуальность данная задача приобретает для так называемых волоконно-оптических радиопотонных систем связи (или Radio-over-Fiber – далее RoF). Системы RoF классически базируются на привлечении физических эффектов к формированию сигналов, что призвано в конечном итоге упростить аппаратную часть [1]. Это, в свою очередь, повышает адаптивность и быстродействие системы передачи, а также снижает ее стоимость.

Необходимо отметить, однако, что управление трафиком подразумевает в первую очередь возможность его мультиплексирования. Для этой цели классически используются ортогональные базисы, например, реализуя уплотнение по времени (системы SDH или Ethernet) или по частоте (системы WDM). Однако количество таких базисов ограничено. В то же время известно, что введение новых «координат» способно существ-

венно увеличить скорость передачи данных. Так, применение DQPSK модуляции к оптическому сигналу позволило достичь значительного повышения битовой скорости передачи в результате задействования ортогональных поляризационных составляющих электрической напряженности поля E световой волны [3-5]. Исследование возможности применения время-частотной характеристики (чирпа) оптического сигнала в качестве дополнительной «координаты» при построении сетей RoF представляется актуальной задачей.

Постановка задачи

Применение чирпирования на сетях связи в настоящее время обусловлено задачей компенсации действия хроматической дисперсии (ХД), особенно если нет возможности применять систему EDC (Electrical Dispersion Compensate). Как правило, это характерно для высокоскоростных систем RoF. Применение средств компенсации ХД, основанных на включении оптоволокон с разными знаками дисперсионного коэффициента, интерференционных устройств и т.п. могут оказаться не очень эффективными, к тому же они вносят искажения в широкополосный и высокоскоростной сигнал. Из-за этого оптический импульс под действием ХД будет уширен, а значит, в сети может увеличиться коэффициент битовых ошибок. В таких условиях представляется интересным применение квазисолитонного режима распространения, когда импульс изначально должен быть сгенерирован чирпированным (рисунок 1). При этом важно решить задачу получения чирпированного импульса как можно более дешевым (аппаратно) способом. В частности, это можно обеспечить применением чирпирующего модулятора Маха-Цендера (Mach-Zender Modulator, MZM).

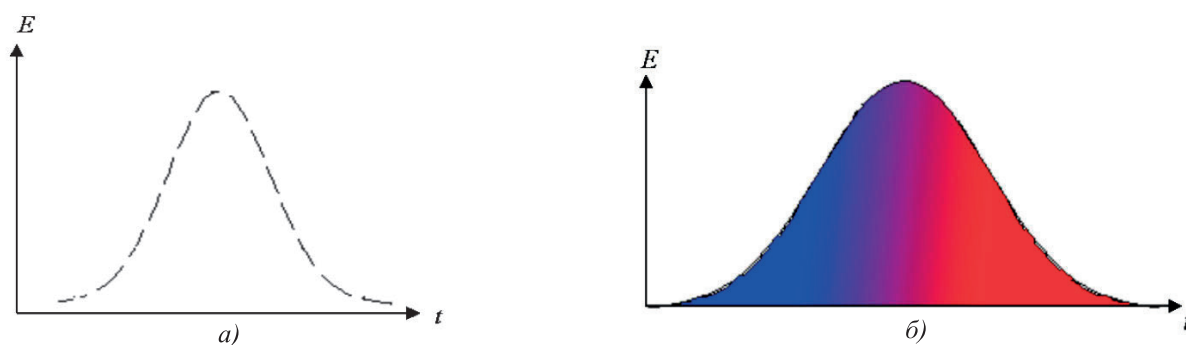


Рисунок 1. Чирпирование оптического импульса: а) нечирпированный импульс, б) положительно чирпированный импульс, который должен быть сгенерирован изначально для противостояния действию ХД

Так, нечирпированный оптический сигнал на выходе модулятора Маха-Цендера описывается выражением [6-7]:

$$E_{\text{вых.}}(t) = \sqrt{P_0} \cos \left[\frac{\pi}{2V_\pi} (-V_b + 2V(t) + \Delta V_1) \right], \quad (1)$$

где P_0 – максимальная оптическая мощность на выходе MZM; V_b – напряжение смещения, выставляющее рабочую точку ММЦ; V_π – напряжение для обеспечения сдвига фаз на π между двумя плечами MZM, $\in [3 \text{ В}, 5 \text{ В}]$; $V(t)$ – сигнал, подаваемый на электрический вход MZM; ΔV_1 – смещение напряжения, необходимое для подстройки теоретического напряжения смещения под экспериментальное.

Чирпирующий модулятор Маха-Цендера выполнен на пластине ниобата лития LiNbO_3 [8]. На подложке из ниобата лития LiNbO_3 располагаются волноводы MZM (плечи интерферометра) и электроды, к которым прикладывается электрическое напряжение. На электроды подается модулирующий электрический сигнал $V(t)$ и рабочая точка V_b , выравнивающая плечи интерферометра. Для внесения переменного чирпирования в оптический сигнал кристалл из ниобата лития срезается по оси Z . Это обеспечивает его неравномерное деформирование при подаче управляющего напряжения, а значит – вносит чирпирование в проходящий сигнал. Следовательно, вносить чирпирование можно плавным изменением рабочей точки модулятора. В связи с вышесказанным напряжением смещения V_b , задающее рабочую точку, можно представить в виде:

$$V_b = V_0 + V_N(t), \quad (2)$$

где V_0 – напряжение, определяющее положение рабочей точки модулятора Маха-Цендера, подаваемое на его управляющий вход; $V_N(t)$ – дополнительное (управляющее) напряжение, также подаваемое на управляющий вход. В этом случае выражение (1) примет вид

$$E_{\text{вых.}}(t) = \sqrt{P_0} \cos \left[\frac{\pi}{2V_\pi} (-V_0 - V_N(t) + 2V(t) + \Delta V_1) \right]. \quad (3)$$

Таким образом, необходимо определить, какое влияние окажет на оптический импульс дополнительное управление рабочей точкой MZM.

Предлагаемое решение

Упростим выражение (3), выделив функцию, зависящую от управляющего напряжения. Тогда сигнал на выходе модулятора можно представить в виде

$$E_{\text{вых.}}(t) = \sqrt{P_0} \left(\cos \left(\frac{\pi}{2V_\pi} (-V_0 + 2V(t) + \Delta V_1) \right) \times \cos \left(\frac{\pi}{2V_\pi} V_N(t) \right) + \sin \left(\frac{\pi}{2V_\pi} [-V_0 + 2V(t) + \Delta V_1] \right) \times \sin \left(\frac{\pi}{2V_\pi} V_N(t) \right) \right). \quad (4)$$

Очевидно, что наличие синусоидальных составляющих сделает зависимость формы импульса от управляющего напряжения слишком сложной. Для их компенсации предлагается применить балансную схему на основе двух модуляторов и фазовращателя (ФВ), инвертирующего управляющий сигнал, поступающий с генератора ГН (см. рисунок 2).

Тогда выражение (4) можно упростить:

$$E_{\text{вых.}}(t) = \sqrt{P_0} \left(\cos \left(\frac{\pi}{2V_\pi} (-V_0 + 2V(t) + \Delta V_1) \right) \times \cos \left(\frac{\pi}{2V_\pi} V_N(t) \right) \right). \quad (5)$$

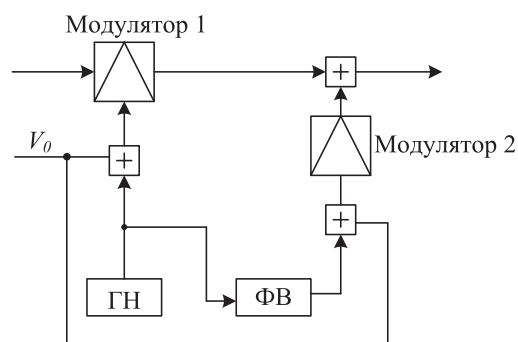


Рисунок 2. Балансная схема компенсации синусоидальных составляющих

Изменение показателя преломления кристалла ниобата лития LiNbO_3 описывается выражением [9] вида

$$\Delta n = -\frac{n_0^3 r}{2} E^a, \quad (6)$$

где n_0 – показатель преломления кристалла ниобата лития без приложенного напряжения;

r – электрооптический коэффициент, м/В; E^a – прикладываемое к кристаллу электрическое поле. Учитывая, что в общем случае диэлектрическая проницаемость ε зависит от частоты f , а следовательно, и от длины волны λ [10], запишем выражение (6) в виде:

$$\Delta n(\lambda) = -\frac{n_0^3(\lambda)r}{2}E^a. \quad (7)$$

Если E^a определяется приложенным переменным внешним напряжением $V_N(t)$ и при этом напряженность поля от внешнего источника намного больше напряженности поля оптического луча, формула (7) примет вид:

$$\Delta n(\lambda, t) = -\frac{n_0^3(\lambda)r}{2}V_N(t)k, \quad (8)$$

где k – коэффициент, обратно пропорциональный расстоянию l от точки наблюдения поля до управляющего электрода, $k=1/l$. Положим также, что напряженность электрического поля направлена строго перпендикулярно пластине ниобата лития. В этом случае $l=d$, где d – толщина кристалла ниобата лития. С учетом вышесказанного изменение показателя преломления будет описываться выражением

$$\Delta n(\lambda, t) = -\frac{n_0^3(\lambda)r}{2}V_N(t)\frac{1}{d}. \quad (9)$$

Учитывая, что показатель преломления кристалла ниобата лития в режиме включения/выключения управления можно представить как: $\Delta n(\lambda, t) = n_0(\lambda) + \Delta n(\lambda, t)$. При этом оптическая длина определяется произведением показателя преломления среды на ее физическую длину $l_0: l = n l_0$. Тогда изменение оптической длины под воздействием внешнего поля можно определить как $\Delta l = l_0(n - n_0)$. В этом случае фазовый сдвиг равен:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta n l = \frac{2\pi}{\lambda}(n - n_0)l_0. \quad (10)$$

Учитывая представленные выше соотношения, получаем:

$$\Delta\phi(\lambda, t) = \frac{2\pi}{\lambda}[n(\lambda, t) - n_0(\lambda)]n(\lambda, t)l_0. \quad (11)$$

Если фазовый сдвиг прямо пропорционален функции чирпа $C(\lambda, t)$, то

$$C(\lambda, t) = \frac{2\pi}{\lambda}(n(\lambda, t) - n_0(\lambda))n(\lambda, t)l_0 = \\ = \frac{2\pi}{\lambda}(n^2(\lambda, t) - n(\lambda, t)n_0(\lambda)).$$

При этом показатель преломления будет равен

$$n_1(\lambda, t) = \frac{n_0(\lambda) + \sqrt{n_0^2 + \frac{4\lambda C(\lambda, t)}{2\pi l_0}}}{2}; \\ n_2(\lambda, t) = \frac{n_0(\lambda) - \sqrt{n_0^2 + \frac{4\lambda C(\lambda, t)}{2\pi l_0}}}{2}. \quad (13)$$

В случае положительного чирпирования вариант $n_2(\lambda, t)$ не имеет физического смысла, поскольку показатель преломления оказывается меньше нуля. С учетом (13), изменение показателя преломления примет вид:

$$\Delta n(\lambda, t) = \frac{n_0(\lambda) + \sqrt{n_0^2 + \frac{4\lambda C(\lambda, t)}{2\pi l_0}}}{2}. \quad (14)$$

Подставляя в (14) выражение (9), получаем:

$$-\frac{n_0^3(\lambda)r}{2}V_N(t)\frac{1}{d} = \\ = \frac{n_0(\lambda) + \sqrt{n_0^2 + \frac{4\lambda C(\lambda, t)}{2\pi l_0}}}{2} + n_0(\lambda). \quad (15)$$

Тогда $V_N(t)$ будет равно:

$$V_N(t) = -\frac{2d}{n_0^3(\lambda)r} \left(\frac{n_0(\lambda)}{2} + \right. \\ \left. + \frac{\sqrt{n_0^2 + \frac{4\lambda C(\lambda, t)}{2\pi l_0}}}{2} - n_0(\lambda) \right). \quad (16)$$

Функция корректирующего чирпа $C(\lambda, t)$ соответственно примет вид:

$$C(\lambda, t) = \frac{2\pi l_0}{\lambda} \left(\frac{n_0^3(\lambda)rV_N(t)}{d} + n_0(\lambda) \right)^2 - \\ - n_0^2(\lambda). \quad (17)$$

Тогда сигнал на выходе модулятора Маха-Цендера, содержащий начальное чирпирование, будет описываться выражением

$$E_{\text{вых.}}(t) = \sqrt{P_0} \left(\cos \left(\frac{\pi}{2V_\pi} (-V_0 + 2V(t) + \Delta V_1) \right) \times \right. \\ \left. \times \cos \left(\frac{\pi}{2V_\pi} \left(-\frac{2d}{n_0^3(\lambda)r} \right) \left(\frac{n_0(\lambda)}{2} + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \sqrt{n_0^2 + \frac{4\lambda C(\lambda, t)}{2\pi l_0}} - n_0(\lambda) \right) \right) \right). \quad (18)$$

Таким образом, доказана возможность предварительного chirпирования оптического импульса за счет дополнительного управляющего электрического сигнала на входе модулятора Маха-Цендера.

Экспериментальная проверка

Для экспериментальной апробации предложенного подхода была собрана установка (см. рисунок 3).

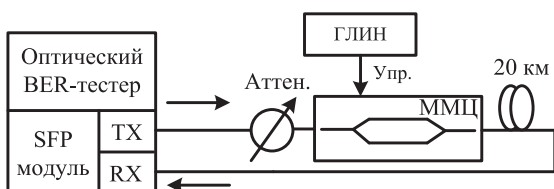
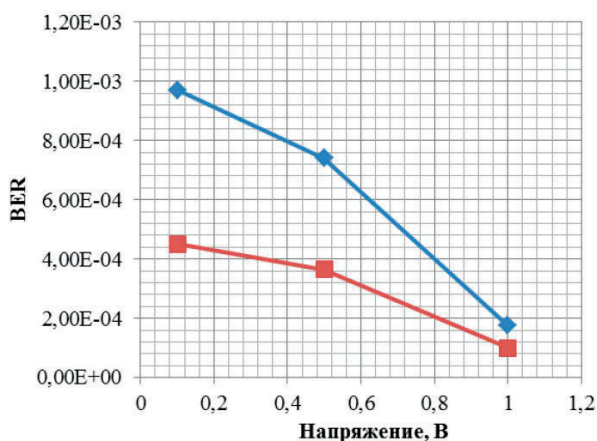


Рисунок 3. Схема экспериментальной установки

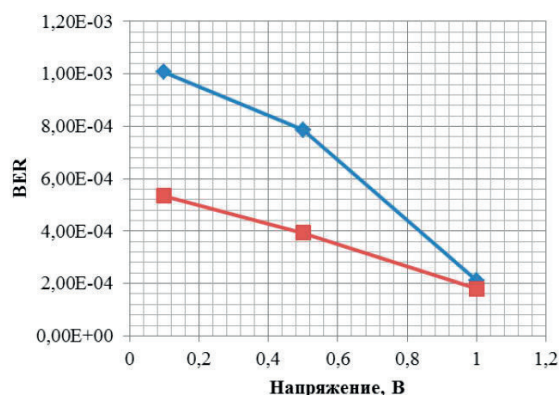
Для исследования коэффициента битовых ошибок использовался оптический BER-тестер со встроенным SFP-модулем. Оптический сигнал с его выхода подавался через аттенуатор на модулятор Маха-Цендера. На управляющий вход модулятора поступал сигнал с генератора линейно-изменяющегося напряжения (ГЛИН). В качестве среды передачи использовалась ВОЛП длиной 20 км. Порядок проведения эксперимента описан ниже. Оптический BER-тестер генерировал псевдослучайную последовательность данных (PRBS-поток), которая подавалась на SFP-модуль. Оптический сигнал с выхода SFP-модуля поступал на аттенуатор, далее на модулятор Маха-Цендера. Пройдя по линии, оптический сигнал поступал на приемный вход SFP-модуля. Далее с помощью оптического BER-тестера оценивалось количество принятых и потерянных битов информации и определялось значение BER. Измерения проводились для двух случаев: при подаче на управляющий вход модулятора постоянного тока и при подаче на управляющий вход модулятора линейно-изменяющегося напряжения.

На рисунке 4 представлены графики зависимости BER от напряжения генератора при подаче на управляющий вход модулятора постоянного напря-

жения и при подаче линейно-изменяющегося напряжения.



а)



б)

— Источник постоянного тока
— ГЛИН

Рисунок 4. Графики зависимости BER от значения напряжения на управляющем входе модулятора Маха-Цендера:

- а) при имитационном моделировании;
- б) полученные в результате эксперимента

Графики зависимости коэффициента битовых ошибок от напряжения на управляющем входе модулятора Маха-Цендера показывают, что при подаче на управляющий вход линейно-изменяющегося напряжения BER улучшается, что подтверждает разработанную математическую модель. При этом результаты имитационного моделирования близки к экспериментальным значениям.

Перспективы использования chirпированных импульсов в ВОЛП для повышения их быстродействия

Функцию chirпа (передачу данных вне основного канала связи за счет управления время-частотной характеристикой) представляется возможным исполь-

зовать, например, для передачи небольших дополнительных объемов информации, таких как служебные или управляющие сигналы сети, а также метки в сетях MPLS. Перспективным также представляется осуществление независимого обмена информацией между контроллерами-менеджерами в разветвленных сетях, включая программно-конфигурируемые сети SDN (Software Defined Networks).

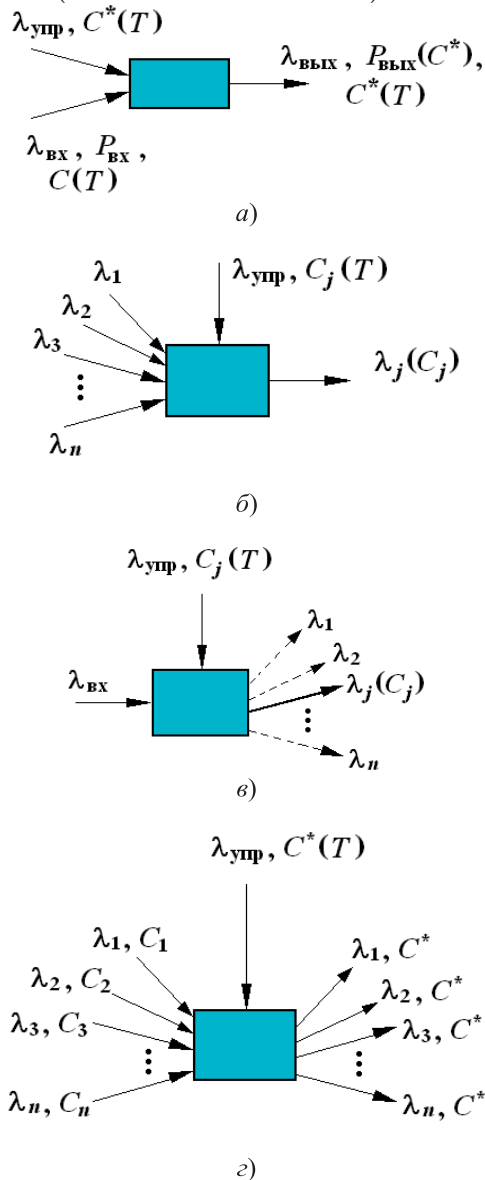


Рисунок 5. Схемы функционального преобразования «форма сигнала \leftrightarrow функция чирпа»:

- приобретение заданного чирпа C^* и/или уровня мощности, зависящего от чирпа, возможно, совместно заданного чирпа и уровня мощности, зависящего от чирпа;
- выбор длины волны λ_j из заданного набора, соответствующей j -ой функции чирпирования C_j ;
- преобразование $\lambda_{\text{вх}}/\lambda_j$ в зависимости от C_j ;
- функция «копирования чирпа», передаваемого всем длинам волн от управляющего сигнала (предполагается, что на входе присутствуют сигналы с произвольным чирпированием)

Слабым местом SDN является затрудненность взаимодействия таких контроллеров. Либо это взаимодействие отсутствует вовсе, что неблагоприятно сказывается на живучести сети, либо взаимодействие осуществляется с использованием транспортных каналов, снижая их пропускную способность для пользовательских данных. Это свойство снижает эффективность применения технологии SDN. Использование дополнительного уплотнения за счет чирпирования передаваемых сигналов позволит осуществить взаимодействие между узлами сети SDN без снижения пропускной способности каналов связи. Для управления функцией чирпирования при этом может применяться не только MZM, но и, в общем случае, нелинейный элемент, использующий эффекты фазовой само- или кросс-модуляции. Для усиления эффекта преобразование можно поместить, например, в многопроходной интерферометр, роль которого может выполнять волоконно-оптическая петля с односторонним ответвлением, или многолучевой интерферометр типа Фабри–Перо. В общем случае такие схемы могут быть как реляционными (с применением дополнительного управляющего воздействия) [1], так и нереляционными, с управлением, «заложенным» в свойствах передаваемого сигнала (см. рисунок 5).

Заключение

В статье рассмотрена возможность введения дополнительного способа передачи сигналов в ВОЛП за счет управления время-частотными характеристиками (чирпирования) оптических импульсов. Предложен метод управления чирпом оптического импульса на основе модулятора Маха-Цендера. В аналитическом виде представлено доказательство возможности такого управления. Приведены результаты эксперимента, подтверждающие снижение BER в ВОЛП при использовании предложенного метода. Представлена концепция применения чирпированных оптических импульсов в SDN для связи контроллеров менеджеров сети.

Следует особенно подчеркнуть, что использование рассматриваемого оптического параметра (чирпа оптических импульсов) основано на оптических эффектах и оптико-оптических взаимодействиях, следовательно, является перспективным с точки зрения реализации концепции полностью оптических сетей связи.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Академии Наук Республики Башкортостан.

тостан и правительства Республики Башкортостан.

Литература

1. Mukherjee B. Optical Communication Networks. – Mc.Graw-Hill, 2005. – 576 p.
2. Перспективы развития сети Интернет // URL: <http://infopud.ucoz.ru/publ/5-1-0-38> (д.о. 29.11.2017).
3. Меккель А.М. Коммутация в оптических транспортных сетях // Фотон-экспресс, 2016. – № 7. – С. 28-33.
4. Can 100Gb/s wavelengths be deployed using 10Gb/s engineering rules? / Ross Saunders, Gary Nicholl, Kevin Wollenweber and Ted Schmidt // URL: <http://www.oclaro.com/> (д.о. 29.11.2017).
5. Sultanov A.Kh., Gaifullin R.R., Vinogradova I.L. Network address encoding methodology on example of Ethernet network // Infokommunikationstechnologien. – 2007. – № 6. – P. 56-60.
6. Alves T., Morant M., Cartaxo A. e.a. Performance comparison of OFDM-UWB radio signals distribution in long-reach PONs using Mach-Zehnder and linearized modulators // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 2011. – Vol. 29 (6). – P. 1311-1320. doi: 10.1109/JSAC.2011.110618
7. Agrawal, G. Lightwave technology telecommunication systems. – Hoboken: John Wiley&Sons Inc. – 2005. – 480 p.
8. Wooten E.L., Kissa K.M., Yi-Yan A. e.a. A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2000. – Vol. 6 (1). – P. 69-82. doi: 10.1109/2944.826874
9. Kaminow I.P., Koch T.L. Optical fiber telecommunications ПИВ. – Holmdel: Academic press. – 1997. – 534 p.
10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Том. VIII. Электродинамика сплошных сред. – М.: Физматлит. – 2005. – 656 с.
11. Анго А. Математика для электро- и радиотехников. Пер. с франц. – М.: Наука. – 1965. – 779 с.

Получено 30.08.2018

Воронкова Анна Владимировна, к.т.н., старший преподаватель Кафедры телекоммуникационных систем (ТС) Уфимского государственного авиационного технического университета (УГАТУ). Тел. +7 917 4940625. E-mail: annette21059@gmail.com

Воронков Григорий Сергеевич, к.т.н., м.н.с. Кафедры ТС УГАТУ. Тел. +7-927-942-00-02. E-mail: voronkov.gs@net.ugatu.su

Янтилина Лилия Зуфаровна, инженер Кафедры ТС УГАТУ. Тел. +7-960-390-08-13. E-mail: kleo-bai@mail.ru

Султанов Альберт Ханович, д.т.н., профессор, заведующий Кафедрой ТС УГАТУ. Тел. +7-347-273-06-89. E-mail: tko@ugatu.ac.ru

Виноградова Ирина Леонидовна, д.т.н., профессор Кафедры ТС УГАТУ. Тел. +7-917-458-01-78. E-mail: vil-4@mail.ru

CONTROLLING TIME-FREQUENCY CHARACTERISTIC OF OPTICAL IMPULSE IN THE RADIO-OVER-FIBER TRANSMISSION SYSTEMS USING MACH-ZEHNDER MODULATOR

*Voronkova A.V., Voronkov G.S., Yantilina L.Z., Sultanov A.Kh., Vinogradova I.L.
Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation
E-mail: annette21059@gmail.com*

The article describes new method of optical signals multiplexing in Radio-over-Fiber networks based on signal's chirp (frequency-time characteristic). A method for chirp control using Mach-Zehnder Modulator is described. Mathematical proof of possibility of chirp control in Mach-Zehnder Modulator is given. The dependence of chirp function on control input voltage is found. The experiment procedure is described. The experiment was conducted using optical BER-tester, Mach-Zehnder Modulator, DC-voltage source, ramp generator and optical line with a length of 20 km. It was found that BER decreases twice when using ramp generator instead of DC-voltage source on control input of Mach-Zehnder Modulator. As a conclusion, the possibility of transmitting a small amount of

additional data (for example, network service information, control signals or switching labels) using the chirp of optical signal is described. The use of chirped signals in SDN is suggested for the transmission of service data between network nodes as an example of practical application for described technology.

Keywords: Radio-over-Fiber, all-optical segment, software defined network, optical chirp, Mach-Zehnder Modulator

DOI: 10.18469/ikt.2018.16.3.03

Voronkova Anna Vladimirovna, Ufa State Aviation Technical University, 12 K. Marx St., Ufa, 450000, Russian Federation; Senior lecturer of the Department of Telecommunication Systems, PhD in Technical Sciences. Tel. +79174940625. E-mail: annette210590@gmail.com

Voronkov Grigory Sergeevich, Ufa State Aviation Technical University, 12 K. Marx St., Ufa, 450000, Russian Federation; Junior researcher of the Department of Telecommunication Systems, PhD in Technical Sciences. Tel. +79279420002. E-mail: voronkov.gs@net.ugatu.su

Yantilina Liliya Zufarovna, Ufa State Aviation Technical University, 12 K. Marx St., Ufa, 450000, Russian Federation; Engineer of the Department of Telecommunication Systems. Tel. +79603900813. E-mail: kleobai@mail.ru

Sultanov Albert Khanovich, Ufa State Aviation Technical University, 12 K. Marx St., Ufa, 450000, Russian Federation; the Head of Department of Telecommunication Systems, Doctor of Technical Science, Professor. Tel. +73472730689. E-mail: tks@ugatu.ac.ru

Vinogradova Irina Leonidovna, Ufa State Aviation Technical University, 12 K. Marx St., Ufa, 450000, Russian Federation; Professor of the Department of Telecommunication Systems, Doctor of Technical Science, Professor. Tel. +79174580178. E-mail: vil-4@mail.ru

References

1. Mukherjee B. *Optical Communication Networks*. Mc.Graw-Hill, 2005. 576 p.
2. Perspektivy razvitiia seti Internet [Perspectives of the Internet develop]. Available at: <http://infopud.ucoz.ru/publ/5-1-0-38> (accessed: 29.11.2017).
3. Mekkel A.M. Kommutatsiia v opticheskikh transportnykh setiakh [Switching in optical back-bone]. *Foton-ekspress*, 2016, no. 7, pp. 28-33.
4. Ross Saunders, Gary Nicholl, Kevin Wollenweber and Ted Schmidt. Can 100Gb/s wavelengths be deployed using 10Gb/s engineering rules? Available at: <http://www.oclaro.com/> (accessed: 29.11.2017).
5. Sultanov A.Kh., Gaifullin R.R., Vinogradova I.L. Network address encoding methodology on example of Ethernet network. *Infokommunikatsionnie tehnologii*, 2007, no 6, pp. 56-60.
6. Alves T., Morant M., Cartaxo A., Llorente R. Performance comparison of OFDM-UWB radio signals distribution in long-reach PONs using Mach-Zehnder and linearized modulators. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2011, vol. 29, pp. 1311-1320. doi: 10.1109/JSAC.2011.110618
7. Agrawal G. *Lightwave technology telecommunication systems*. Hoboken, John Wiley&Sons Inc., 2005. 480 p.
8. Wooten E.L., Kissa K.M., Yi-Yan A. et al. A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, vol. 6, pp. 69-82. doi: 10.1109/2944.826874
9. Kaminow I.P., Koch T.L. *Optical fiber telecommunications IIIB*, Holmdel: Academic press, 1997. 534 p.
10. Landau L.D. *Teoreticheskaiia fizika: T. VIII. Elektrodinamika sploshnykh sred* (Theoretical physics: vol. VIII Electrodynamics of Continuous Media). Moscow, FIZMATLIT Publ., 2005. 656 p.
11. Angot A. *Complements de mathematiques à l'usage des ingénieurs de l'électrotechnique et des télécommunications*. (Russ. ed.: A. Ango. Matematika dlia elektro- i radioinzhenerov. Moscow, Nauka Publ., 1965. 472 p.

Received 30.08.2018