

Журнал включен в перечень периодических научных изданий, рекомендуемый ВАК Минобрнауки России для публикации научных работ, отражающих основное научное содержание кандидатских и докторских диссертаций.

Учредитель

ООО "Издательский дом Медиа Паблшер"

Главный редактор

Тихвинский Валерий Олегович

Издатель

Дымкова Светлана Сергеевна

ds@media-publisher.ru

Редакционная коллегия

Аджемов Артём Сергеевич

(д.т.н., профессор, ректор МТУСИ), Россия

Алексеев Евгений Борисович

(д.т.н., профессор, начальник отдела информационных ресурсов и интеллектуальной собственности МТУСИ), Россия

Вааль Альберт

(д.т.н., старший научный сотрудник Ганноверского университета им. Лейбница на кафедре коммуникационной техники), Германия

Головачев Юлиус

(управляющий консультант Detecon International GmbH), Германия

Дулкейтс Эрик

(д.т.н., старший исполнительный директор корпорации Detecon), Силиконовая долина, США

Зубарев Юрий Борисович

(д.т.н., член-корреспондент РАН, заслуженный деятель науки РФ, зам. председателя экспертного совета ВАК по электронике, радиотехнике и связи), Россия

Кирхгесснер Юрий

(д.т.н., Директор Incotology Ltd.), Великобритания

Кузовкова Татьяна Алексеевна

(д.э.н., декан экономического факультета МТУСИ), Россия

Кюркчан Александр Гаврилович

(д.ф.-м.н., профессор ФГОБУ ВПО МТУСИ), Россия

Сеилов Шахмаран Журсинбекович

(д.э.н., Президент Казахской академии инфокоммуникаций), Казахстан

Сысоев Николай Николаевич

(д.ф.-м.н., декан физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова), Россия

Шарп Майкл

(д.э.н., вице-президент европейского института стандартизации – ETSI), Великобритания

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНОЛОГИИ

Алексеев Е.Б.

Требования к технической эксплуатации цифровых транспортных сетей, обеспечивающие целостность и устойчивость функционирования единой сети электросвязи Российской Федерации 4

Аджемов А.С., Хромой Б.П.

Обеспечение единства измерений хроматической дисперсии в оптическом волокне 8

Аджови Агбогбо Ерос.

Введение в поляризационную модовую дисперсию 11

Андреев В.А., Бурдин В.А., Бурдин А.В.

Перспективы применения маломодовых технологий на высокоскоростных протяженных ВОЛП 14

Антонова В.М., Маликова Е.Е.

Исследование взаимного влияния полезного и служебного трафика в сетях LTE 17

Ботвинко А.Ю., Самуйлов К.Е.

Анализ схемы управления доступом в сети CDMA с резервированием для мягких хэндовер-вызовов 22

Богомолова Н.Е., Маликова Е.Е.

Стратегия динамического опроса датчиков, установленных на промышленных объектах, с учетом их зависимого срабатывания 26

Бородакий В.Ю., Гудкова И.А., Острикова Д.Ю.

Рекуррентный алгоритм расчета среднего времени недоступности услуги пользователю для модели соты сети LTE 31

Виноградов А.Н., Терешонок М.В.

Особенности проектирования программного обеспечения современного комплекса мониторинга радиоэфира 36

Ефанов В.И., Гриншпон Я.С.,

Вождаев Д.В., Уткина А.С.

Расчет потерь в делителях оптической мощности и затухания в оптическом волокне 39

Зубилевич А.Л., Колесников В.А.

К определению вероятностно-временных параметров оптического кабеля 42

Карякин В.Л., Карякин Д.В., Морозова Л.А.

Метод измерений и калибровки задержек сигнала в передатчиках стандарта DVB-T2 46

Лобов Е.М., Косилов И.С., Кандауров Н.А., Елсуков Б.А.

Методика оценки параметров частотной дисперсии ионосферного канала с помощью широкополосного фазоманипулированного сигнала 49

Манонина И.В.

Использование вейвлет-анализа для оценки качества рефлектограмм 54

Портнов Э.Л., Мариносян Э.Х.

Хроматическая дисперсия в одномодовых оптических волокнах и ее ограничения при чирпировании 60

Портнов Э.Л., Григорьян А.К.

Поляризационная модовая дисперсия на волоконно-оптической линии передачи 62

Пустовойтов Е.Л., Евстратов А.Г.

Расчет влияния мешающего радиосигнала на приемник цифровой системы радиосвязи при известных законах распределения быстрых и медленных замираний полезного и мешающего радиосигналов 65

Рыков К.С.

Исследование квазилинейной эквивалентной схемы биполярного транзистора для анализа линейного режима и сатурации в усилителях мощности 71

Сиднев С.А., Зубилевич А.Л., Царенко В.А.

Выбор грозостойкого кабеля по экономическим критериям в условиях неопределенности 77

Сперанский В.С., Клинцов О.И.

Оптические цифровые элементы обработки сигналов 80

Трещиков В.Н., Наний О.Е., Леонов А.В.

Особенности разработки DWDM-систем высокой емкости 83

Шелухин О.И., Филинова А.С.

Сравнительный анализ алгоритмов обнаружения аномалий трафика методами дискретного вейвлет-анализа 89

PUBLICATIONS IN ENGLISH

Valery O. Tikhvinskiy, Grigory Bochechka.

Concept and QoS requirements in 5G networks 99

Hiang Chuan, Tan.

LTE/LTE-Advanced PHY Layer Coding Rate Based Performance Verification 102

CONTENT

TECHNOLOGIES

Alekseev E.B.

Requirements for the technical operation of the digital transport networks, ensuring the integrity and stability of the unified telecommunication network of the Russian Federation

4

Adzhemov A.S., Khromoy B.P.

Ensuring the uniformity of measurements chromatic dispersion in an optical fiber

8

Adjovi Agbogbo Eros.

Introduction to polarization mode dispersion

11

Andreev V.A., Burdin V.A., Bourdine A.V.

Possibilities of few-mode technologies application for high-speed long-haul optical fiber links

14

Veronika Antonova, Elena Malikova.

The research of the influence of the service and the information traffic on each other in LTE networks

17

Botvinko A.Yu., Samouylov K.Y.

Analysis of Call Admission Control Schemes in CDMA Network with Reservation for Soft Handovers Calls

22

Natalya Bogomolova, Elena Malikova.

Dynamic sensor survey strategy, installed in industrial sites upon the dependent activity of sensors

26

Borodakiy V.Yu., Gudkova I.A., Ostrikova D.Y.

Recursive algorithm for calculating mean service downtime in LTE network model

31

Vinogradov A.N., Tereshonok M.V.

Features of approach to contemporary radio monitoring software development

36

Efanov V.I., Grinshpon Ya.S.,

Vozhdaev D.V., Utkina A.S.

Loss Calculation in Optic Power Divisors and Damping in Single-mode Optic Fiber

39

Alexander Zubilevich, Vyacheslav Kolesnikov.

To the definition of time-probabilistic parameters of the optical cable

42

Vladimir Karyakin, Dmitry Karyakin,

Lyudmila Morozova.

Method of measuring and calibration delays signal to in transmitters DVB-T2 standard

46

Lobov Evgeny, Kosilov Ilya,

Kandaurov Nikolay, Elsukov Boris.

Method of estimating the parameters of the frequency dispersion of ionospheric channel via wideband BPSK

49

Manonina Irina.

Using wavelet analysis to assess the quality of reflectogram

54

Portnov E.L., Marinosyan E.H.

Chromatic dispersion in single-mode optical fiber and its limitations when chirping

60

Portnov E.L., Grigoryan A.K.

PMD in a fiber-optic transmission line

62

Evstratov A.G., Pustovoitov E.L.

Analysis of interfering signal impact on a digital system receiver in case of given set of signal and interference fading distributions

65

Rykov K.S.

Investigation of the Quasi-Linear Equivalent Circuit Model of BJT for Power Amplification Analysis

71

Serge Sydney, Alexander Zubilevich, Vladimir Tsarenko.

Choice stormsteady cable according to economic criteria in conditions of uncertainty

77

Speransky V.S., Klintsov O.I.

Optical Logic Signal Processing Devices

80

Treshchikov V.N., Naniy O.E., Leonov A.V.

Aspects of development of high capacity DWDM systems

83

Sheluhin O.I., Filinova A.S.

The comparative analysis of detection algorithms detection of traffic anomalies methods of the discrete wavelet-analysis

89

PUBLICATIONS IN ENGLISH

Valery O. Tikhvinskiy, Grigory Bochechka.

Concept and QoS requirements in 5G networks

99

Hiang Chuan, Tan.

LTE/LTE-Advanced PHY Layer Coding Rate Based Performance Verification

102

Заказ журналов:

- по каталогу "Роспечать" (индекс 80714)
- "Деловая пресса" (www.delpress.ru)
- в редакции (t-comm@yandex.ru)

Региональные подписные агентства

<http://www.media-publisher.ru/raspr.shtml>

Периодичность выхода — 12 номеров в год

Стоимость одного экземпляра 500 руб.

Целевая аудитория по распространению

- Телекоммуникационные компании
- Дистрибьюторы телекоммуникационного оборудования и услуг
- Контент-провайдеры
- Разработчики и производители абонентского оборудования
- Энергетические компании
- Автотранспортные предприятия
- Компании, занимающиеся железнодорожными, воздушными и морскими перевозками
- Логистические компании
- Провайдеры охранно-поисковых услуг
- Геодезические и картографические организации
- Государственные ведомства и организации;
- Строительные компании
- Профильные учебные заведения

Тираж 3000 экз. + Интернет-версия

Редакция

Издатель

Светлана Дымкова
ds@media-publisher.ru

Директор отдела развития и рекламы

Ольга Дорошкевич
ovd@media-publisher.ru

Отдел распространения и подписки

info@media-publisher.ru

Предпечатная подготовка

ООО "ИД Медиа Паблшер"

Поддержка Интернет-портала

Сергей Алексанян

Адрес редакции

111024, Россия, Москва,
ул. Авиамоторная, д. 8, офис 512-514
e-mail: t-comm@yandex.ru
Тел.: +7 (495) 957-77-43

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.

Свидетельство о регистрации: ПИ № ФС77-27364.

Язык публикации: русский, английский.

Мнения авторов не всегда совпадают с точкой зрения редакции. За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несет

Материалы, опубликованные в журнале — собственность ООО "ИД Медиа Паблшер". Перепечатка, цитирование, дублирование на сайтах допускаются только с разрешения издателя

All articles and illustrations are copyright. All rights reserved. No reproduction is permitted in whole or part without the express consent of Media Publisher Joint-Stock Company

Плата с аспирантов за публикацию рукописи не взимается

© ООО "ИД Медиа Паблшер", 2014

www.media-publisher.ru

Особенности разработки DWDM-систем высокой емкости

Представлены результаты разработки российской DWDM-системы с канальной скоростью 100 Гбит/с и спектральной эффективностью 3 бит/с/Гц. Пропускная способность системы — до 27 Тбит/с по паре оптических волокон. Выполнен обзор зарубежных разработок DWDM-систем сравнимой ёмкости, проведён анализ различных используемых способов повышения спектральной эффективности DWDM-систем. Показано, что усложнение формата модуляции приводит к заметному снижению дальности передачи сигнала. Показано, что системы 100G на основе модуляции DP-QPSK с плотным расположением каналов по своей спектральной эффективности лишь незначительно уступают существующим системам "400G" на основе модуляции DP-16QAM, а по произведению максимальной ёмкости на дальность передачи — существенно превосходят их. Проведено исследование характера деградации когерентных оптических сигналов под действием нелинейных эффектов в DWDM-системах высокой емкости. Рассмотрено две основные конфигурации ВОЛС: а) Канал 100G в окружении каналов 10G в линиях с компенсаторами дисперсии; б) Канал 100G в линиях без компенсаторов дисперсии. Показано, что при распространении сигнала в формате DP QPSK совместно с 10 Гбит/с сигналами в формате OOK, сигналы 10G вызывают нелинейные искажения, существенно ухудшающие характеристики сигнала 100G. Однако этот штраф может быть уменьшен на 3-5 дБ за счёт использования специальных алгоритмов обработки принимаемого сигнала. Показано, что в линиях без компенсации дисперсии воздействие нелинейных эффектов ослабляется, становится случайным по своей природе и проявляется на оптическом приемнике как шум. Выведена формула, которая может быть использована для косвенного измерения мощности нелинейного шума на основе измеримых параметров реальной линии. В заключение представлен действующий мировой рекорд по передаче 100G сигнала, поставленный компанией "Т8": передача десяти каналов 100 Гбит/с на расстояние 500,4 км в однопролетной линии без использования регенерационных пунктов или промежуточных усилителей с электрическим питанием. Экспериментально подтверждены исключительные технические характеристики представленного оборудования.

Ключевые слова: DWDM, когерентные оптические системы, 100G сигнал, спектральная эффективность, нелинейные эффекты, ёмкость DWDM-систем, дальность передачи.

Трещиков В.Н.,

генеральный директор ООО "Т8", к.ф.-м.н., vt@t8.ru

Наний О.Е.,

начальник отдела ООО "Т8", д.ф.-м.н., профессор МГУ, nanii@t8.ru

Леонов А.В.,

научный консультант ООО "Т8", к.ф.-м.н., leonov.av@t8.ru

В связи с ростом объемов передаваемой информации потребность в увеличении скорости передачи информации растет на всех уровнях, начиная с локальных сетей и соединений между компьютерами и заканчивая дальними транспортными сетями, охватывающими всю планету. Наиболее остро задача увеличения пропускной способности при сохранении дальности передачи информации без регенерации сигнала стоит в волоконно-оптических сетях дальней связи. Для ее решения в настоящее время во всем мире системы с канальной скоростью 10 Гбит/с и прямым детектированием заменяют когерентными оптическими системами с канальными скоростями 40 и 100 Гбит/с [1-3]. Когерентное детектирование в новом поколении систем связи позволяет увеличить объем передаваемой информации, используя спектрально-поляризационное уплотнение каналов, а также спектрально-эффективные форматы модуляции.

В России разработкой DWDM-систем высокой ёмкости занимается компания «Т8» [4-6]. С 2013 года при поддержке Фонда Сколково реализуется проект по созданию отечественной DWDM-системы ёмкостью 27 Тбит/с, представленный в настоящей статье. В ходе разработки этой системы выполнен анализ деградации сигнала в DWDM-системах высокой ёмкости под воздействием нелинейных эффектов, экспериментально подтверждены исключительные характеристики оборудования (поставлен действующий мировой рекорд по скорости и дальности передачи DWDM-сигнала в однопролетной линии). Представлен краткий обзор основных особенностей разработки DWDM-систем высокой ёмкости.

100G транспонеры DP-QPSK компании «Т8»

В 2012 г. компания «Т8» представила 100G транспонеры и мукспонеры (агрегирующие транспонеры) собственной разработки, а также 100G DWDM-систему «Волга» на их основе. Транспондер обеспечивает передачу клиентского сигнала 100 Гбит/с по оптическому каналу, с возможностью настройки лазера на любой из 96 DWDM-каналов в расширенном С-диапазоне (с шагом 50 ГГц). Мукспондер отличается тем, что агрегирует несколько низкоскоростных клиентских сигналов в один канал. Таким образом, пропускная способность DWDM-системы «Волга» по паре волокон составляет 9,6 Тбит/с.

Транспонеры и мукспонеры «Волга» обладают исключительными техническими характеристиками. Пороговая чувствительность транспондера — всего 12,5 дБ, электронная компенсация дисперсии — до 75000 пс/нм. Благодаря этому, на DWDM-платформе «Волга» с 2012 года было поставлено несколько мировых рекордов в передаче 100 Гбит/с сигнала.

При разработке 100G транспондера использованы наиболее современные технологии — коррекция ошибок SoftFEC и когерентный приём сигнала в формате DP-QPSK (Dual Polarization – Quadrature Phase Shift Keying, четырехуровневый фазовый формат модуляции с поляризационным мультиплексированием). Формат DP-QPSK обеспечивает наибольшую эффективность использования независимых параметров светового излучения (фаза и поляризация), рис. 1. Благодаря сочетанию высокой спектральной и энергетической эффективности, формат DP-QPSK обеспечивает максимальную производительность систем связи (произведение дальности на суммарную скорость передачи информации).



Рис. 1. Сигнал формата DP-QPSK

С использованием платформы «Волга» возможно формирование DWDM-системы с пропускной способностью до 700 Гбит/с в одном шасси, до 5 Тбит/с – в одной 19” стойке. Специалистами «Т8» введено в эксплуатацию свыше 55 000 км DWDM-сетей, из них более 10 000 км составляют скоростные 100 Гбит/с каналы. С 2013 года началась разработка DWDM-системы нового поколения с пропускной способностью до 27 Тбит/с.

Прототип DWDM-системы емкостью 27 Тбит/с

Специалисты компании «Т8» создали прототип DWDM-системы со спектральной эффективностью 3 бит/с/Гц. В стандартной полосе оптического мультиплексора шириной 100 ГГц передаются три когерентных канала 100G (по 33 ГГц на канал), рис. 2, что обеспечивает возможность передачи до 270 каналов 100G в C+L диапазоне. Таким образом, общая пропускная способность созданной DWDM-системы может достигать 27 Тбит/с.

Важное преимущество созданной системы – возможность работы на существующей сетевой инфраструктуре (в C-диапазоне ёмкость системы составляет 12 Тбит/с). При уплотнении каналов 100G с использованием стандартной сетки 100 ГГц не требуется замена мультиплексоров или усилителей в промежуточных пунктах сети.

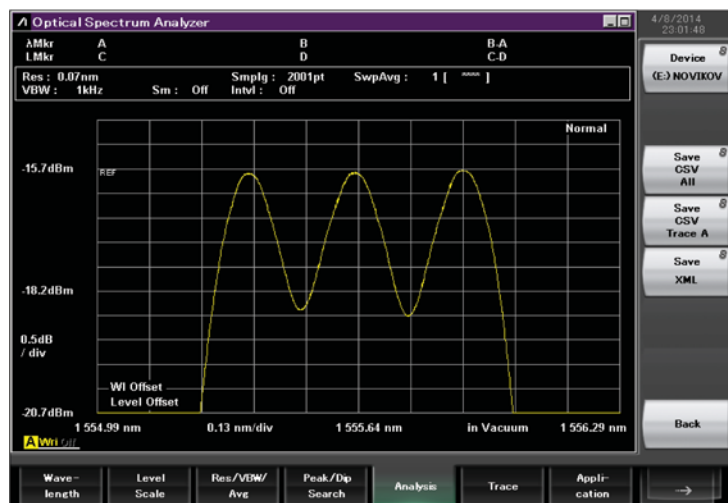


Рис. 2. Спектр суперканала 3x100G в сетке 100 ГГц

В таблице 1 представлены характеристики прототипа «300G в сетке 100 ГГц», разработанного компанией «Т8» (строка 3), в сравнении с существующей системой «Волга» компании «Т8» (строка 1) и различными вариантами реализации систем «400G», которые предлагаются мировыми производителями (строки 4 и 5).

Из таблицы видно, что переход от систем 100G к системам «400G» вовсе не означает повышения пропускной способности системы в 4 раза. Для корректного сравнения пропускной способности различных вариантов DWDM-систем необходимо учитывать не только канальную скорость, но и ширину спектральной полосы, которую занимает один канал. Для этого используется такой параметр, как спектральная эффективность (плотность информационного потока на 1 Гц спектра).

Теоретический предел спектральной эффективности для модуляции DP-QPSK – 4 бит/с/Гц, для модуляции

DP-16QAM – 8 бит/с/Гц. Существующие решения «400G» на основе модуляции DP-16QAM имеют спектральную эффективность в среднем около 4 бит/с/Гц (максимум – 5,3). Ряд статей о реализации DWDM-систем на основе модуляции DP-16QAM был представлен на конференции OFC в г. Сан-Франциско в марте 2014 г., табл. 2.

Таблица 1

Спектральная эффективность DWDM-систем

№	Тип решения	Символьная скорость, Гбод	Формат модуляции (число бит на символ)	Полоса, ГГц	Спектральная эффективность, бит/с/Гц
1	1x100G в сетке 50 ГГц	25	DP-QPSK (2*2=4 бит/с)	50	100 Гбит/с / 50 ГГц = 2
2	1x400G	100 – технически невозможно	DP-QPSK (2*2=4 бит/с)	-	-
3	3x100G в сетке 100 ГГц	25	DP-QPSK (2*2=4 бит/с)	100	300 Гбит/с / 100 ГГц = 3
4	2x200G в сетке 100 ГГц	25	DP-16QAM (2*4=8 бит/с)	100...75*	400 Гбит/с / 75...100 ГГц = 4...5,3
5	1x400G в сетке 100 ГГц	50 – сложно реализовать	DP-16QAM (2*4=8 бит/с)	100 (?)	400 Гбит/с / 100 ГГц = 4

**) Даже при использовании каналом 2x200G полосы, более узкой, чем 100 ГГц, в реальных сетях придётся задействовать полный канал мультиплексора 100 ГГц.*

Таблица 2

Решения «400G», представленные на OFC 2014

Вендор	Тип эксперимента	Скорость на несущую и ширина спектра	Формат передачи	Дальность
Alcatel [7]	Real time	200G на несущую, 50 ГГц (4 б/с/Гц) и 37,5 ГГц (5,33)	PDM-16QAM	400 км для 50 ГГц (300 км для 37,5)
Siena [8]	Real time	200G на несущую, 42 ГГц (4,76)	DP-16QAM	410 км
Huawei [9]	Offline DSP* осциллограф	200G на несущую, 50 ГГц (4)	PDM-QPSK	3040 км
NEC [10]	Offline DSP* осциллограф	200G на несущую, 37,5 ГГц (>5)	DP-16QAM	630 км
NEC [11]	Offline DSP* осциллограф	200G на несущую, 44 ГГц (4,54)	DP-8QAM	485 км петля, симуляция 6787 км
Alcatel [12]	Offline DSP* осциллограф	400G на несущую, 120 ГГц (3,3)	DP-16QAM	400 км петля, симуляция 4800 км

**) Offline DSP - приём сигнала на цифровом осциллографе, запись результатов на диск и последующая их обработка на компьютере.*

Подчеркнём, что на OFC 2014 ни один производитель не представил результаты для реального оборудования с 400G на несущую. Именно поэтому в данной статье мы пишем «400G» в кавычках.

Таким образом, переход от систем с канальной скоростью 100G на основе модуляции DP-QPSK к системам «400G» на сегодняшний день позволяет повысить спектральную эффективность в среднем всего в 1,5 раза (в не в 4, как может показаться на первый взгляд).

При сравнении экономической эффективности DWDM-систем необходимо учитывать не только спектральную эффективность, но и дальность передачи (максимальную длину регенерационного участка). Дальность передачи определяется пороговой чувствительностью приёмника (дБ): при каком отношении уровня полезного сигнала к уровню шума в линии он ещё способен принять и расшифровать поступающий сигнал. В технике связи эта величина называется $OSNR_{тр}$ («требуемое отношение сигнал-шум», «требуемый OSNR»). Чем ниже пороговая чувствительность приёмника – тем лучше. На таком оборудовании можно строить более протяжённые линии связи без регенерации сигнала.

При переходе к более высоким форматам модуляции, пороговая чувствительность приёмника неизбежно ухудшается (возрастает) из-за более плотного расположения состояний сигнала в фазовом пространстве. Поэтому переход к более сложным форматам модуляции влечёт за собой существенное (в несколько раз) снижение дальности передачи, рис. 3.

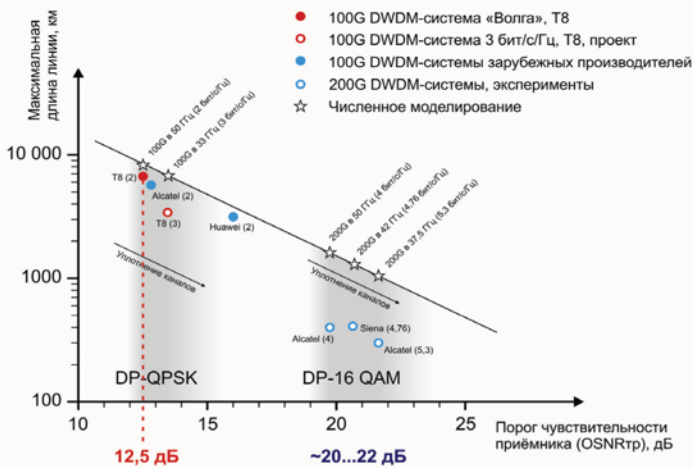


Рис. 3. Решения с разной плотностью расположения каналов 100G и 200G. Характеристики DWDM-систем зарубежных производителей оценены примерно на основе доступных данных. В скобках указана спектральная эффективность

Таким образом, системы 100G на основе модуляции DP-QPSK с плотным расположением каналов по своей спектральной эффективности лишь незначительно уступают существующим системам «400G» на основе модуляции DP-16QAM, а по произведению максимальной ёмкости на дальность передачи – существенно превосходят их.

Деграция сигнала под действием нелинейных эффектов

Значение $OSNR_{тр}$ в реальной линии оказывается заметно выше, чем при прямом соединении передатчика с приёмником (*back-to-back*, *BTB*). Например, для 100G транспондера «Т8» $OSNR_{тр}$ на реальных линиях может достигать 17-20 дБ, в то время как $OSNR_{тр, BTB} = 12,5$ дБ. Разница между $OSNR_{тр}$ реальной линии и $OSNR_{тр, BTB}$ называется «штрафом по OSNR» для этой линии.

Причина возникновения штрафа по OSNR – деграция оптического сигнала под действием нелинейных эффектов. В связи с этим особую актуальность приобретает исследование характера деграции когерентных оптических сигналов под действием нелинейных эффектов в DWDM-системах высокой емкости.

С практической точки зрения, наиболее важен анализ воздействия нелинейных эффектов на когерентную линию связи для двух основных конфигураций ВОЛС:

- Канал 100G в окружении каналов 10G в линиях с компенсаторами дисперсии

- Канал 100G в линиях без компенсаторов дисперсии

Первая конфигурация возникает при развитии существующих магистральных линий связи и постепенном увеличении их пропускной способности за счёт замены некоторых каналов 10G на когерентные каналы 100G (при этом в части DWDM-каналов продолжают работать традиционные системы связи с прямым детектированием и оптической компенсацией дисперсии). Вторая конфигурация возникает при построении новых линий без компенсаторов дисперсии, сразу рассчитанных на когерентные системы со скоростями 100 Гбит/с и больше.

Исследования показывают, что в коротких ВОЛС или в длинных ВОЛС с компенсаторами дисперсии нелинейные эффекты проявляются в основном в виде искажений формы передаваемых оптических сигналов. В линиях без оптической компенсации хроматической дисперсии механизм нелинейной деграции сигнала оказывается существенно иным и может быть описан как накопление нелинейного интерференционного шума.

100G в окружении 10G с компенсаторами дисперсии

В линиях, где сигналы в формате DP QPSK распространяются совместно с 10 Гбит/с сигналами в формате OOK, основной причиной штрафа является фазовая кросс-модуляция от каналов 10 Гбит/с [13]. На рис. 4 показана фазовая диаграмма одной из поляризационных компонент DP QPSK сигнала при распространении в линии совместно с каналом 10 Гбит/с на расстоянии 100 ГГц. Видно, что соседний канал 10 Гбит/с вызывает заметное искажение сигнала DP QPSK.

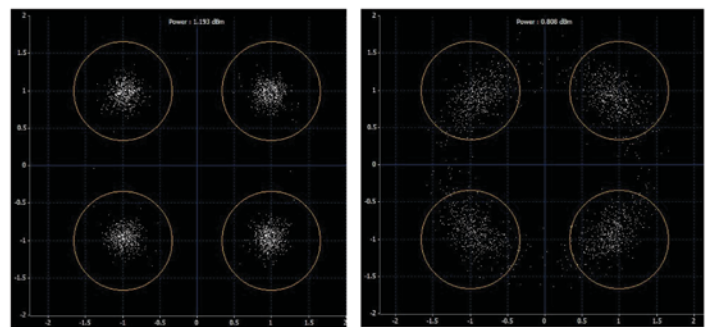


Рис. 4. Искажение сигнала DP QPSK 100 Гбит/с при распространении в линии совместно с сигналом OOK 10 Гбит/с (справа). Слева – неискажённый сигнал 100 Гбит/с

Таким образом, нелинейные искажения, создаваемые соседними 10 Гбит/с каналами, существенно ухудшают характеристики DP QPSK 100 Гбит/с канала. Штраф для канала 100 Гбит/с, создаваемый соседними 10 Гбит/с каналами, заметно зависит от числа каналов в DWDM-системе. Влияние на качество 100G канала оказывают не только соседние, но и удаленные по частоте каналы: например, в линиях на основе волокна NZDSF необходимо учитывать воздействие до 40 соседних каналов.

Качество передачи 100G сигнала в окружении каналов 10G может быть улучшено в несколько раз за счёт использования специальных алгоритмов обработки. Так, компанией T8 была реализована новая технология обработки 100G сигнала, которая позволила увеличить запас по OSNR более чем в два раза. Выигрыш по качеству сигнала при применении новых алгоритмов обработки составил 3-5 дБ, рис. 5.

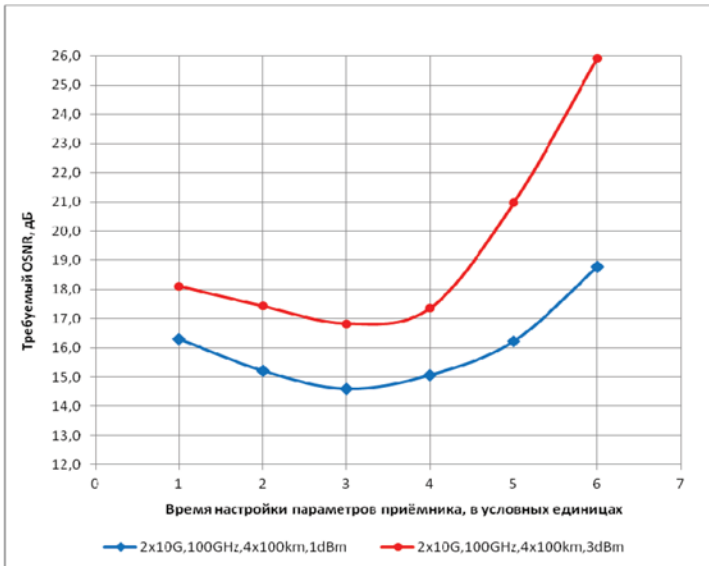


Рис. 5. Зависимость требуемого OSNR от времени настройки параметров приёмника, канал 100G в окружении двух каналов 10G с интервалом 100 ГГц, линия 4x100 км с компенсацией дисперсии

Полученный результат позволяет добиться значительно большего эксплуатационного запаса по OSNR даже в тех случаях, где ранее требовалась регенерация сигнала. Применение нового алгоритма обработки сигналов позволяет широко использовать DWDM-систему «Волга» для апгрейда существующих DWDM-линий со скоростями 10G путем добавления 100G каналов.

Нелинейные искажения в линиях без компенсаторов дисперсии

В ВОЛС без оптической компенсации дисперсии оптическое поле приобретает случайный характер из-за дисперсионных эффектов, приводящих к пространственному перекрытию сотен или тысяч передаваемых символов. Вследствие большой накопленной дисперсии воздействие нелинейных эффектов ослабляется, становится случайным по своей природе и проявляется на оптическом приемнике как шум, рис. 6.

Нелинейный шум не регистрируется при измерениях OSNR с помощью оптического спектр-анализатора, поскольку его спектр совпадает со спектром сигнала или незначительно уширяет спектр сигнала. Именно поэтому OSNR_{тр}, измеренный с помощью оптического спектр-анализатора на реальной линии, оказывается выше, чем OSNR_{тр, втв}.

Если предположить, что нелинейный шум гауссов и линейно суммируется с усиленным спонтанным излучением, то:

$$OSNR_{BER} = \frac{P_s}{P_{ASE} + P_{NLI}}$$

что эквивалентно:

$$\frac{1}{OSNR_{BER}} = \frac{1}{OSNR_{ASE}} + \frac{1}{OSNR_{NLI}}$$

откуда:

$$P_{NLI} = P_s \left(\frac{1}{OSNR_{BER}} - \frac{1}{OSNR_{ASE}} \right)$$

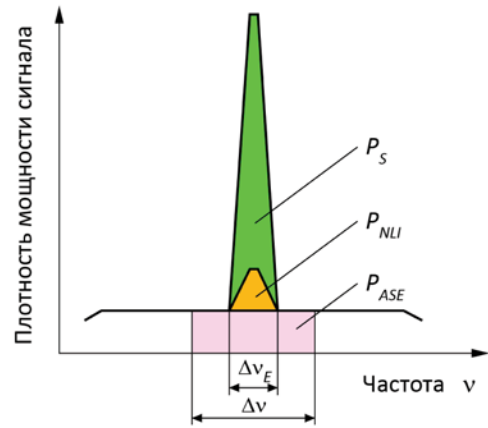


Рис. 6. P_s – мощность сигнала, P_{NLI} – мощность нелинейного шума, P_{ASE} – мощность усиленного спонтанного излучения

Эта формула может быть использована для косвенного измерения мощности нелинейного шума. Измеримыми параметрами реальной линии являются BER до FEC (который измеряется непосредственно транспондером 100G производства «T8») и OSNR_{ASE} (который может быть измерен оптическим спектр-анализатором). С использованием калибровочной кривой транспондера (взаимосвязь OSNR и BER до FEC в конфигурации «back-to-back»), на основе измеренного BER вычисляется OSNR_{BER}.

Исследования показывают, что в линиях без компенсации дисперсии нелинейный штраф накапливается медленнее по длине линии, что позволяет достичь существенно большей дальности ВОЛС, рис. 7. [3].

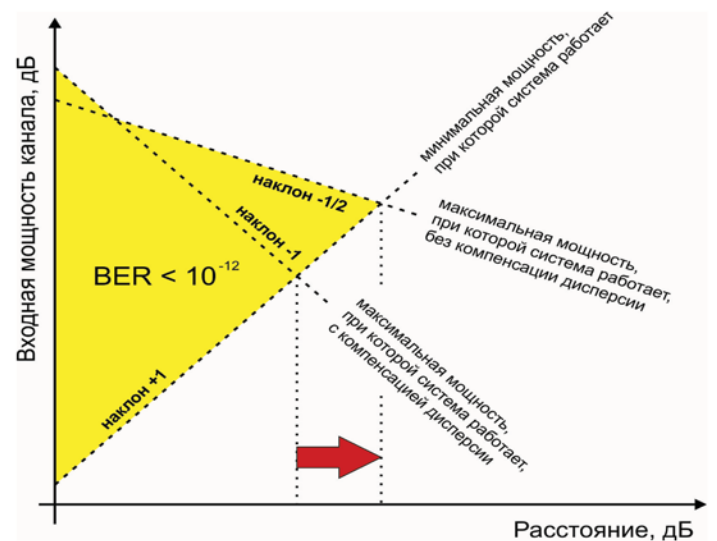


Рис. 7. Допустимая входная мощность канала для многопролётных линий с компенсацией дисперсии и без компенсации дисперсии, в зависимости от протяженности линии

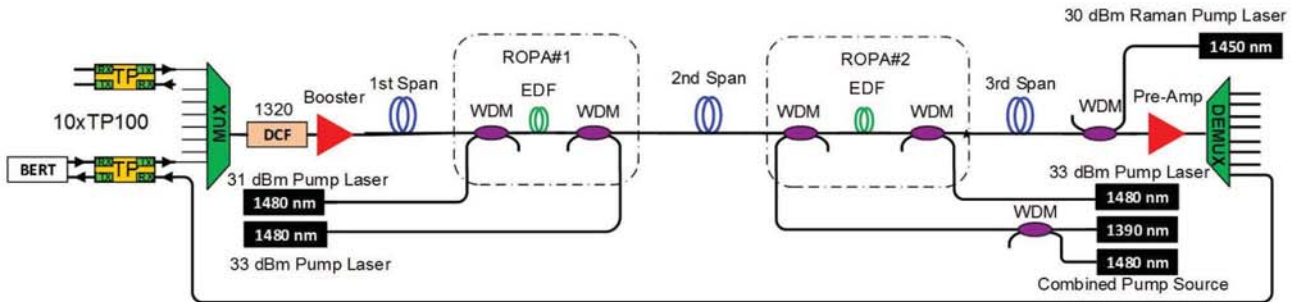


Рис. 8. Схема эксперимента 10 x 100G на 500 км

В 2012 г. компанией «Т8» был поставлен мировой рекорд дальности передачи канала 100G в 80-канальной DWDM-системе без компенсаторов дисперсии и без регенерации сигнала: 4000 км [3]. При этом достигнутая дальность передачи была ограничена не величиной шумов (линейных и нелинейных), а максимальной величиной накопленной хроматической дисперсии, которую может компенсировать цифровой процессор, используемый в DWDM-системе «Волга». Запас по OSNR позволяет оценить максимальную дальность передачи, ограниченную уровнем шумов, величинами порядка 6–8 тысяч километров.

Эксперимент:

1 Тбит/с на 500 км с удалённой накачкой

В ноябре 2013 г. компания «Т8» осуществила передачу десяти каналов 100 Гбит/с на расстояние 500,4 км в однопроточной линии без использования регенерационных пунктов или промежуточных усилителей с электрическим питанием [2]. Это достижение является действующим мировым рекордом. Схема эксперимента представлена на рис. 8. Обозначения: DCF – модуль компенсации дисперсии; WDM – оптический разветвитель; EDF – волокно, легированное эрбием; Booster, Pre-Amp – усилитель мощности и предусилитель, установленные в терминалах линии.

Увеличение длины передачи достигнуто благодаря применению встречного рамановского усиления и удаленной накачке эрбиевых усилителей (ROPA). Для модуляции сигнала применялся формат DP-QPSK и когерентный прием. Для передачи сигнала использовалось одномодовое волокно SMF-28 ULL со сверхнизким затуханием и низкой поляризационной модовой дисперсией от компании Corning. В эксперименте использовались 100G транспонеры TS-100E «Волга» (OSNR_{тр, втв} = 12,5 дБ) производства компании «Т8».

Бюджет линии – 78,9 дБ. Затухание на пролётах представлено в табл. 3.

Таблица 3

Затухание на пролётах

Линия	Затухание, дБ/км	Длина, км
Первый пролет	0,162 (1550 нм)	52,8
Второй пролет	0,155 (1550 нм)	303,3
Третий пролет	0,158 (1550 нм)	146,7
ROPA1 - доставка 1	0,2/0,159 (1480/1550 нм)	50,5
ROPA1 - доставка 2	0,2/0,159 (1480/1550 нм)	50,4
ROPA2 - доставка 1	0,2/0,159 (1480/1550 нм)	147,6
ROPA2 - доставка 2	0,2/0,156 (1480/1550 нм)	147,2

На рис. 9 представлены результаты эксперимента. Частота битовых ошибок (BER) во всех десяти каналах 100 Гбит/с не превышала предельный уровень (BER threshold) в течение всего времени проведения эксперимента.

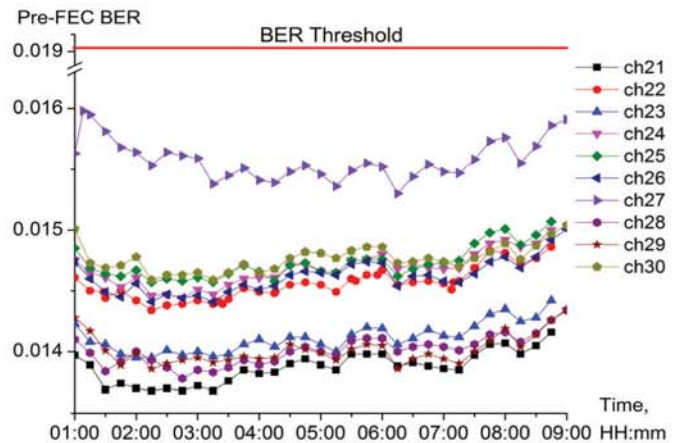


Рис. 9. Результаты эксперимента (10 каналов): 8-часовое тестирование 13.11.2013 (01:00 – 09:00)

Возможности увеличения ёмкости DWDM-систем

На протяжении многих лет ёмкость DWDM-систем возрастала пропорционально увеличению канальной скорости. При этом удавалось сохранять дальность передачи за счёт различных технических приёмов, прежде всего, благодаря использованию дополнительных степеней свободы светового излучения и развитию технологий коррекции ошибок. Так, при переходе от 2,5G к 10G дальность передачи была сохранена за счёт использования упреждающей коррекции ошибок FEC. При переходе от 10G к 40G – за счёт использования фазовой модуляции DPSK и технологии SuperFEC. При переходе от 40G к 100G – за счёт когерентного приёма, использования двух поляризаций сигнала (формат модуляции DP-QPSK) и технологии упреждающей коррекции ошибок с мягким принятием решений (Soft FEC).

Однако с появлением систем 100G в этой тенденции наметился перелом. В системах 100G с когерентным приёмом была достигнута предельная эффективность использования независимых параметров светового излучения (фаза и поляризация), дальнейшее усложнение модуляции неизбежно ведёт к существенному падению дальности передачи. Также был достигнут предел символьной скорости передачи, определяемый физическими характеристиками материала: её предельные значения находятся на уровне 50 Гбод, «ком-

фортные» (с точки зрения реализации на стандартной элементной базе) – на уровне 25 Гбод.

Дальнейшее увеличение ёмкости DWDM-системы может достигаться за счёт уплотнения каналов, расширения спектрального диапазона, использования более сложных форматов модуляции, использования многосердцевидных волокон.

Такие способы, как расширение используемого спектрального диапазона или использование многосердцевидных волокон, требуют капитальных вложений в инфраструктуру сети. В первом случае, требуется замена эрбиевых усилителей и мультиплексоров на всех промежуточных пунктах сети. Во втором случае, требуется замена волоконно-оптических кабелей.

Наибольший интерес для операторов связи представляют такие решения, которые могут быть реализованы на существующей инфраструктуре сети. К таким решениям относятся использование более сложных форматов модуляции и (с некоторыми ограничениями) уплотнение каналов. Как было показано в статье, переход к решениям «3x100G» и «2x200G» (без замены инфраструктуры) уже сегодня позволяет достичь спектральной эффективности 3-4 бит/с/Гц.

Литература

1. S. Gringeri, N. Bitar, and T. J. Xia. Extending software defined network principles to include optical transport // IEEE Communications Magazine, March 2013, pp. 32-40.
2. Gainov V.V., Gurkin N.V., Lukin S.N., Akopov S.G., Makovejs S., Ten S.Y., Nani O.E., Treshchikov V.N. Record 500 km unrepeated 100 Gb s-1 transmission // Laser Physics Letters, Vol. 10 (2013), №7, 075107.
3. N.V. Gurkin, O.E. Nani, A.G. Novikov, S.O. Plaksin, V.N. Treshchikov, R.R. Ubaydullaev. Nonlinear interference noise in 100-Gbit s communication lines with the DP-QPSK modulation format // Quantum Electronics, Vol. 43 (2013), № 6, pp. 550-553.

4. Гуркин Н.В., Трещиков В.Н., Новиков А.Г., Наний О.Е. Российское DWDM-оборудование с канальной скоростью 100 Гбит/с // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт, 2012, №4. – С. 65-67.

5. Гуркин Н.В., Наний О.Е., Трещиков В.Н. Производительность когерентных DWDM-систем с канальной скоростью 100 Гбит/с // Вестник связи, 2013, №1. – С. 39-40; №2. – С. 40-42.

6. Наний О.Е., Трещиков В.Н., Ubaydullaev P.P. Дальность работы и пропускная способность когерентных систем связи // Вестник связи. 2013. – №9. – С. 17-19.

7. Annachiara Pagano, Emilio Riccardi, Marco Bertolini, Vitaliano Farelli, Tony Van De Velde. 400Gb/s Real-time Trial Using Rate-adaptive Transponders for Next Generation Flexible-grid Networks // OFC 2014, Tu2B.4.pdf.

8. Yu Rong Zhou, Kevin Smith, Roger Payne, Andrew Lord, Glenn Whalley, Tex Bennett, Eric Maniloff, Savchenko Alexander, and David Boymel. Real-Time Gridless 800G Super-channel Transport Field Trial over 410km Using Coherent DP-16 QAM // OFC 2014, Tu2B.3.pdf.

9. Liangchuan Li, Yanzhao Lu, Ling Liu, Deyuan Chang, Zhiyu Xiao, Yijia Wei. 20x224Gbps (56Gbaud) PDM-QPSK Transmission in 50GHz grid over 3040km G.652 fiber and EDFA only link Using Soft Output Faster than Nyquist Technology // OFC 2014, W3J.2.pdf.

10. Ming-Fang Huang, Shaoliang Zhang, Katsyuki Mino, and Yoshiaki Aono. Transmission of 400G Dual-Carrier DP-16QAM and Multi-Carrier DP-QPSK Signals over Regional and Long-Haul Distances with Span Lengths Greater than 200 km // OFC 2014, Th4F.3.pdf.

11. Shaoliang Zhang, Fatih Yaman, and Ting Wang. Transoceanic Transmission of Dual-Carrier 400G DP-8QAM at 121.2km Span Length with EDFA-Only // OFC 2014, W1A.3.pdf.

12. G. Raybon, A. Adamiecki, S. Randel, P. J. Winzer. Single-Carrier and Dual-Carrier 400-Gb/s and 1.0-Tb/s Transmission Systems // OFC 2014, Th4F.1.pdf.

13. A. Carena, V. Curri, G. Bosco, P. Poggiolini, F. Forghieri. Modeling of the Impact of Non-Linear Propagation Effects in Uncompensated Optical Coherent Transmission Links // Journal of Lightwave Technology, Vol. 30, No. 10, pp. 1524-1539, 2012.

Aspects of development of high capacity DWDM systems

Treshchikov V.N., general director, LLC "T8", candidate of physical and mathematical sciences, vt@t8.ru; Naniy O.E., head of department, LLC "T8", doctor of physical and mathematical sciences, professor of the Moscow State University, naniy@t8.ru; Leonov A.V., scientific consultant, LLC "T8", candidate of physical and mathematical sciences, leonov.av@t8.ru

Abstract. The article presents results of development of Russian DWDM system with a channel rate of 100 Gbit/s and a spectral efficiency of 3 bit/s/Hz. System capacity is up to 27 Tbit/s on a pair of optical fibers. The review of foreign DWDM systems of comparable capacity is performed, and the analysis of various ways of improving spectral efficiency of DWDM systems is conducted. It is shown that the increase of complexity of the modulation format leads to significant decrease of the signal transmission range. It is shown that the spectral efficiency of 100G systems based on the DP-QPSK modulation with a dense arrangement of channels are only insignificantly inferior to existing "400G" systems based on DP-16QAM modulation, while the product of maximum capacity by transmission range for such 100G systems significantly exceeds the same parameter of existing "400G" systems. A study of the degradation of coherent optical signal under the action of nonlinear effects in high-capacity DWDM systems is performed. Two basic configurations of fiber optic lines are considered: a) 100G channel surrounded with 10G channels in lines with dispersion compensators; b) 100G channel in lines without dispersion compensators. It is shown that in case of propagation of the signal in the DP-QPSK format together with 10 Gbit/s signal in OOK format, the last ones cause nonlinear distortion which significantly degrades 100G signal. However, this penalty may be reduced by 3-5 dB by using special algorithms for processing the received signal. It is shown that in the lines without dispersion compensators, the effect of nonlinear effects is reduced, becomes random and is manifested in the optical receiver as noise. A formula is derived which can be used to indirectly measure the nonlinear noise power based on measurable parameters of the real line. In conclusion, we present the current world record for transmission of 100G signal set by LLC "T8": the transmission of ten 100 Gbit/s channels over a distance of 500.4 km in a single-span fiber optic line without the use of regenerative points or intermediate amplifiers with electrical power. Thus, the exclusive specifications of presented equipment are experimentally confirmed.

Keywords: DWDM, coherent optical systems, 100G signal, spectral efficiency, nonlinear effects, capacity of DWDM systems, distance of transmission.

References

1. S. Gringeri, N. Bitar, and T. J. Xia. Extending software defined network principles to include optical transport // IEEE Communications Magazine, March 2013, pp. 32-40.
2. Gainov V.V., Gurkin N.V., Lukin S.N., Akopov S.G., Makovejs S., Ten S.Y., Naniy O.E., Treshchikov V.N. Record 500 km unrepeated 100 Gb s-1 transmission // Laser Physics Letters, Vol. 10 (2013), No7, 075107.
3. Gurkin N.V., Naniy O.E., Novikov A.G., Plaksin S.O., Treshchikov V.N., Ubaydullaev R.R. Nonlinear interference noise in 100-Gbit s-1 communication lines with the DP-QPSK modulation format // Quantum Electronics, Vol. 43 (2013), No6, pp. 550-553.
4. Gurkin N.V., Treshchikov V.N., Novikov A.G., Naniy O.E. The Russian DWDM equipment with channel speed of 100 Gbit/c // T-Comm, 2012, No4, P. 65-67.
5. Gurkin N.V., Naniy O.E., Treshchikov V.N. Capacity of coherent DWDM systems with channel speed of 100 Gbps // Vestnik Svyazi, 2013, No1, P. 39-40; No2, P. 40-42.
6. Naniy O.E., Treshchikov V.N., Ubaydullaev R.R. Operating range and bandwidth of coherent communication systems // Vestnik Svyazi. 2013. No9, P. 17-19.
7. Annachiara Pagano, Emilio Riccardi, Marco Bertolini, Vitaliano Farelli, Tony Van De Velde. 400Gb/s Real-time Trial Using Rate-adaptive Transponders for Next Generation Flexible-grid Networks // OFC 2014, Tu2B.4.pdf.
8. Yu Rong Zhou, Kevin Smith, Roger Payne, Andrew Lord, Glenn Whalley, Tex Bennett, Eric Maniloff, Savchenko Alexander, and David Boymel. Real-Time Gridless 800G Super-channel Transport Field Trial over 410km Using Coherent DP-16 QAM // OFC 2014, Tu2B.3.pdf.
9. Liangchuan Li, Yanzhao Lu, Ling Liu, Deyuan Chang, Zhiyu Xiao, Yijia Wei. 20x224Gbps (56Gbaud) PDM-QPSK Transmission in 50GHz grid over 3040km G.652 fiber and EDFA only link Using Soft Output Faster than Nyquist Technology // OFC 2014, W3J.2.pdf.
10. Ming-Fang Huang, Shaoliang Zhang, Katsyuki Mino, and Yoshiaki Aono. Transmission of 400G Dual-Carrier DP-16QAM and Multi-Carrier DP-QPSK Signals over Regional and Long-Haul Distances with Span Lengths Greater than 200 km // OFC 2014, Th4F.3.pdf.
11. Shaoliang Zhang, Fatih Yaman, and Ting Wang. Transoceanic Transmission of Dual-Carrier 400G DP-8QAM at 121.2km Span Length with EDFA-Only // OFC 2014, W1A.3.pdf.
12. G. Raybon, A. Adamiecki, S. Randel, P. J. Winzer. Single-Carrier and Dual-Carrier 400-Gb/s and 1.0-Tb/s Transmission Systems // OFC 2014, Th4F.1.pdf.
13. A. Carena, V. Curri, G. Bosco, P. Poggiolini, F. Forghieri. Modeling of the Impact of Non-Linear Propagation Effects in Uncompensated Optical Coherent Transmission Links // Journal of Lightwave Technology, Vol. 30, No10, pp. 1524-1539, 2012.