

## ПРЕДИСЛОВИЕ

На магистральных оптических транспортных сетях большой протяженности и сетях мегаполисов России широко используются многоканальные телекоммуникационные системы WDM (Wavelength Division Multiplex, системы с разделением каналов по длине волны  $\lambda$  оптического излучения) с пропускной способностью оптических каналов равной 2,5 Гбит/с, 10 Гбит/с и/или 40 Гбит/с. Общая пропускная способность таких систем по одному стандартному оптическому волокну (ОВ) составляет от сотен гигабит в секунду (например,  $40\lambda \times 10$  Гбит/с) до нескольких терабит в секунду (например,  $160\lambda \times 40$  Гбит/с). Функция кросс-переключения цифровых сигналов TDM (Time Division Multiplexing, мультиплексирование с временным разделением) цифровых потоков, меньших или равных пропускной способности оптических каналов систем WDM, реализуется преимущественно на основе технологии SDH (Synchronous Digital Hierarchy, синхронной цифровой иерархии). Формирование, консолидация и маршрутизация пакетного трафика для последующей его передачи поверх транспортного уровня производится на IP/MPLS/TP-MPLS (Internet Protocol/Multiprotocol Label Switching—Transport Profile, интернет протокол/многопротокольная коммутация по меткам и ее транспортный профиль) или на Ethernet сервисном уровне сети. Следует отметить также поэтапное внедрение на сетях WDM систем кросс-коммутации клиентских потоков с размещением их в полях полезной нагрузки виртуальных транспортных структур оптической транспортной иерархии OTN/OTH (Optical Transport Network — Optical Transport Hierarchy, оптическая транспортная сеть/оптическая транспортная иерархия) и собственно оптической кроссовой коммутации. Эти средства позволяют прозрачно передать любые клиентские потоки и увеличить эффективность использования пропускной способности оптических каналов.

По мере роста объемов передаваемого интернет-трафика, развития облачных технологий, скорости передачи по оптическим каналам систем WDM выросли от 10 Гбит/с до 40 Гбит/с и 100 Гбит/с, что привело к необходимости стандартизации интерфейсов Ethernet 40 GbitE и 100 GbitE (за-

вершена в 2010 г.) и стимулировало разработку и стандартизацию новых средств масштабирования, передачи и кросс-коммутации пакетных и TDM потоков на транспортном уровне сети WDM.

Российские операторы транспортных сетей («Ростелеком», «Транстелеком», «Билайн» и др.) в 2012 г. начали внедрять оборудование со скоростью передачи 100 Гбит/с когерентного типа ведущих производителей (Ciena, Alcatel-Lucent, Cisco, «Т8» и др.) в свои оптические транспортные сети.

В настоящее время российские (компания «Т8») и зарубежные исследователи активно занимаются разработкой и внедрением методов формирования, передачи и приема по каналам систем с плотным мультиплексированием волн DWDM, Dense WDM (плотное с фиксированным интервалом между каналами 0,8 нм, 0,4 нм, 0,2 нм, 0,1 нм и гибким с интервалом от 0,05 нм до 0,4 нм, названным в стандарте ITU-T G.694.1 flex grid) цифровых потоков 400 Гбит/с и 1 Тбит/с, которые станут преобладающими в ближайшее десятилетие на магистральных транспортных сетях. При этом основным реализуемым методом передачи сигналов в оптических каналах будет когерентный, который позволяет существенно (до 20 дБ) повысить энергетический потенциал системы и совместно с упреждающей коррекцией ошибок FEC (Forward Error Correction) и электронной компенсацией дисперсии увеличить протяженности оптических коммутируемых каналов до 2–4 тыс. км. Таким образом, в ближайшее время (до 2020 г.) пропускные возможности уже существующих волоконных сетей могут достигнуть десятков терабит в секунду (около 25 Тбит/с на волокно), появится принципиально новый класс оптических сетей с гибкой оптической и цифровой коммутацией, выделением/вводом оптических когерентных каналов, высокоэффективной модуляцией (4–8 бит/с/Гц), низкой чувствительностью к дисперсионным искажениям. Сети такого типа уже получили в специальной, научной и технической литературе наименование «*Когерентные оптические сети — Coherent Optical Networking*».

Назрела необходимость коррекции учебных дисциплин подготовки бакалавров и магистров по направлению «Информационные технологии и системы связи» в части включения в лекционные, лабораторно-практические заня-

тия и самостоятельную работу студентов (курсовые и дипломные работы) необходимых сведений, методик, справочных характеристик по существу когерентных оптических сетей связи. В настоящее время практически отсутствует какая-либо учебная литература по данной теме. Пара известных публикаций [1, 2] представляет собой сборники статей, которые дают минимальные необходимые инженерные знания для изучения, расчетов, проектирования когерентных сетей, но рассчитаны на профессионально подготовленных специалистов.

Предлагаемое учебное пособие составлено на основе привлечения информационных и методических материалов от различных научных, технических и специальных изданий, стандартов сектора телекоммуникаций Международного союза электросвязи (МСЭ-Т, ITU-T, International Telecommunications Union — Telecommunications services sector) и IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers — Институт инженеров по электротехнике и электронике), электронных ресурсов ведущих производителей оборудования оптических сетей и т. д.

Учебное пособие предназначено для бакалавров и магистров, обучающихся по направлению «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», профилей бакалавров: «Многоканальные телекоммуникационные системы» и «Оптические системы и сети связи», изучивших основы волоконной оптики и волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) с мультиплексированием PDH, SDH, Ethernet, CWDM, DWDM. Также может быть полезным аспирантам и специалистам предприятий связи, внедряющих технику оптической связи нового поколения.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

AES, Advanced Encryption Standard — продвинутый стандарт шифрования

AES-GCM, AES Galois/Counter Mode — алгоритм аутентификации

AES-GMAC, AES Galois Message Authentication Code — сообщение кода аутентификации

AES-XTS, AES Ciphertext Stealing — режимы шифрования

AMP, Asynchronous Mapping Procedure — процедура асинхронного размещения

AO-OFDM, All-Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing — полностью оптическое мультиплексирование с ортогональным частотным разделением

ASE, Amplified Spontaneous Emission — усиленная спонтанная эмиссия

ASON, Automatic Switched Optical Network — автоматически коммутируемая оптическая сеть

ATM, Asynchronous Transfer Mode — асинхронный режим передачи

AWG, Array-waveguide-grating — волноводная решетка

BDI, Backward Defect Indication — индикация дефекта в обратное направление

BDI-P, BDI Payload — индикация дефекта в обратную сторону для нагрузки

BDI-O, BDI Overhead — индикация дефекта в обратную сторону для заголовка

BEI, Backward Error Indication — индикатор ошибки в обратное направление

BIAE, Backward Incoming Alignment Error — ошибки согласования на входе для передачи в обратном направлении

BIP-8, Bit Interleaved Parity — пересчет чередующихся 8 бит для определения ошибок в оптическом канале

BMP, Bit-synchronous Mapping Procedure — процедура бит-синхронного размещения

BOA, Booster Optical Amplifier — оптический усилитель мощности

BOSA, Bidirectional Optical Sub. Assembly — двунаправленная оптическая сборка

BPSK, Binary Phase-Shift Keying — двухпозиционная фазовая манипуляция

CFP, C-Form-Factor Pluggable — промышленный стандарт на модули 40/100 Гбит/с

CFP, C-Form Factor — промышленный стандарт модульных компактных приемопередатчиков (трансиверов), используемых для передачи данных в телекоммуникациях обычно на скоростях до 100 Гбит/с

CFP2, CFP4 modules support 4×25G electrical I/O being defined in the Next Generation 100Gb/s — модули поддержки передачи 4×25 Гбит/с электрических сигналов при последующем преобразовании в волны оптических сигналов для 100 Гбит/с интерфейсов

Client 10×10G, 12×10G, 3×40G, 1×100G — скорости передачи данных пользователей оптической транспортной сети (10×10 Гбит/с, 12×10 Гбит/с, 3×40 Гбит/с, 1×100 Гбит/с)

CSF, Cut-off Shifted Fibre — смещенная длина волны отсечки

CWDM, Coarse Wavelength Division Multiplex — грубое мультиплексирование с разделением по длине волны

DAPI, Destination Access Point Identifier — идентификатор адреса информации точки доступа

DBR, Distributed Bragg Reflector — распределенный брэгговский отражатель

DFB, Distributed Feed-Back — распределенная обратная связь

DP-QPSK, Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keyed optical modulation — двойная поляризация с оптической квадратурной фазовой модуляцией

DRWA, Dynamic Routing and Wavelength Assignment — динамическая маршрутизация и назначение волн

DSP, Digital Signal Processing — цифровая обработка сигналов

DWDM, Dense WDM — плотное WDM

EAMs, Electro-Absorption Modulators — электроабсорбционные модуляторы

EDFA, Erbium-Doped Fiber Amplifier — эрбиевый волоконный усилитель

1,4 EFEC; 1,7 EFEC; 1,9 EFEC — параметры сверточного кодирования для Ethernet с упреждающей коррекцией ошибок

Fabric Interface — интерфейс преобразования

FAS, Frame Alignment Signal — синхросигнал, указывающий на начало цикла

FBG, Fiber Bragg Grating — волоконная брэгговская решетка

FDI, forward Defect Indicator — индикация дефекта вперед

FDI-O, FDI-Overhead — FDI заголовок

FDI-P, FDI-Payload — FDI нагрузка

FEC, Forward Error Correction — упреждающая коррекция ошибок

FIFL, Fault Type and Fault Location Reporting Communication Channel — сообщение в коммуникационном канале о типе повреждения и его локализации

FMF, Few mode fiber — маломодовое волокно (2, 3, 4... 16 мод)

FP, Fabri-Perot — Фабри-Перо

FSK, Frequence-shift Keying — частотная манипуляция

FWM, Four-Wave Mixing — четырехволновое смешивание

GCC, General Communication Channel — общий канал связи

GFEC, Generic Forward Error Correction — общая процедура упреждающей коррекции ошибок

GFP, Generic Framing Procedure — общая процедура формирования кадра

GMP, Generic Mapping Procedure — общая процедура размещения

G-MPLS, Generalized Multi-Protocol Label Switching — общий протокол многопротокольной коммутации по меткам

IAE, Incoming Alignment Error — ошибки согласования на входе

IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers — институт инженеров по электротехнике и электронике

ILF, Interleave Filter — полосный оптический фильтр

IP/MPLS/TP-MPLS, Internet Protocol/Multiprotocol Label Switching — Transport Profile — интернет протокол/многопротокольная коммутация по меткам и ее транспортный профиль

ITU-T, International Telecommunications Union — Telecommunications services sector — сектор телекоммуникаций Международного Союза Электросвязи

LO, Local Oscillator — локальный генератор

MCF, Message communications Function — функции передачи сообщений

MCF, Multicore Fiber — многосновное (многосердцевинное) волокно

MCM, Multicarrier Modulation — модуляция многих несущих

MFAS, Multiframe Alignment Signal — синхросигнал сверхцикла

MFD, Mode Field Diameter — диаметр поля моды

MIB, Management Information Base — информационная база управления

Module Interface — интерфейсный модуль

MQW, Multiple Quantum Wells — множественные квантовые ямы

MXP, Multi-rate, Multiprotocol Muxponder — многопротокольный, многоскоростной мультиплексирующий транспондер

NDSF, Non-Dispersion Shifted Fiber — волокно со смещенной ненулевой дисперсией

NLSE, Non Linear Schrodinger Equation — нелинейное уравнение Шредингера

NNI, Network Node Interface — межузловой интерфейс

OADM, Optical Add-Drop Multiplexer — оптический мультиплексор выделения/ввода

OAM&P, Operation, Administration, Maintenance and Provisioning — эксплуатация, администрирование, техническое обслуживание и настройка

ОССо, Optical Channel Carrier — overhead — заголовок оптического канала

OCh, Optical Channel — оптический канал

ОССр, Optical Channel Carrier — payload — нагрузка оптического канала

OCG-n.m, Optical Carrier Group — группа оптических каналов

OCI, Open Connection Indication — индикация открытого соединения

ODU, Optical channel Data Unit — блок данных оптического канала

ODUk, Optical channel Data Unit-k — комплексно стандартизированный блок ODU уровня k, где  $k = 1, 2, 3, 4$

ODUk.ts, Optical channel Data Unit k fitting in ts tributary slots, блоки с установкой временных позиций

ODUkP, Optical channel Data Unit-k Path monitoring level — блоки с уровнем мониторингом соединения (тракта) из конца в конец

ODUkT, Optical channel Data Unit-k Tandem connection monitoring level — блоки с определенным уровнем мониторинга тандемных соединений

ODUk-Xv, X virtually concatenated ODUks — виртуально сцепленные блоки (X — число блоков)

OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing — мультиплексирование с ортогональным частотным разделением

OMS, Optical Multiplex Section — оптическая секция мультиплексирования

OMU-n.m, Optical Multiplex Unit — оптический блок мультиплексирования

ONE, Optical Network Element — оптический сетевой элемент

OPLL, Optical Phase Locked Loop — оптическая петля управления фазой

OPSMnk, Optical Physical Section Multilane — многолинейная оптическая физическая секция

OPU, Optical channel Payload Unit — блок нагрузки оптического канала

OPUk Optical channel Payload Unit-k — комплексно стандартизированный блок OPU уровня k, где  $k = 1, 2, 3, 4$

OPUk-Xv X virtually concatenated OPUks, блок нагрузки оптического канала с виртуальной сцепкой (X — число сцепляемых OPU)

OSC, Optical Supervisory Channel — оптический сервисный канал

OSNR, Optical Signal-to-Noise Ratio — оптическое отношение сигнал/шум

OTL, Optical channel Transport Lane — канал оптической транспортной линии

OTLCG, Optical Transport Lane Carrier Group — группа каналов оптической транспортной линии

OTLCp, Optical Transport Lane Carrier payload — нагрузка канала оптической линии



ОТМ, Optical Transport Module — оптический транспортный модуль

OTN/OTH, Optical Transport Network — Optical Transport Hierarchy — оптическая транспортная сеть/оптическая транспортная иерархия

OTS, Optical Transmission Section — оптическая секция передачи

OTU, Optical Transport Unit — оптический транспортный блок

OTUk, completely standardized Optical channel Transport Unit-k — комплексно стандартизированный блок OTU уровня k, где  $k = 1, 2, 3, 4$

OTUk-v, Optical channel Transport Unit-k with vendor specific OTU FEC — оптический транспортный блок со спецификацией упреждающей коррекции ошибок

OTUkV, functionally standardized Optical channel Transport Unit-k — функционально стандартизированный блок OTU

OVCО, Optical Voltage Controlled Oscillator — оптический генератор, управляемый напряжением

ОХС, Optical Cross-Connect — оптическая кроссовая коммутация

PBC, Polarization Beam Combiner — поляризационно-зависимый объединитель

PBS, Polarization Beam Splitters — поляризационно-зависимые разветвители

PDH, Plesiochronous Digital Hierarchy — плезиохронная цифровая иерархия

PLC, Planar Lightwave Circuit — планарный волновой канал

PMI, Payload Missing Indication — индикация отсутствия нагрузки

PON, Passive Optical Network — пассивная оптическая сеть

Proprietary — программное обеспечение (ПО), являющееся частной собственностью авторов или правообладателей и не удовлетворяющее критериям свободного ПО

PSK, Phase-shift Keying — фазовая манипуляция

QSFP, Quad (4-channel) Small Form-factor Pluggable (QSFP or QSFP+) — разновидность четырехканального модуля SFP

ROADM, Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer — перестраиваемый оптический мультиплексор выделения/ввода

ROSA, Receiver Optical Sub — Assembly — сборка оптического приемника

RSVP-TE, Resource Reservation Protocol — Traffic Engineering — протокол резервирования ресурса — проектирования трафика

RWA, Routing and Wavelength Assignment — маршрутизация и назначение волны

SAPI, Source Access Point Identifier — идентификатор источника (передатчика) точки доступа

SBS, Stimulated Brillouin Scattering — стимулированное рассеяние Брюэллена

SDH, Synchronous Digital Hierarchy — синхронной цифровой иерархии

SFP, Small Form-factor Pluggable — компактный сменный форм-фактор

SM, Section Monitoring — наблюдение секции

SMF, Single Mode Fiber — одномодовое оптическое волокно

SOA, Semiconductor Optical Amplifier — полупроводниковый оптический усилитель

SFP, Small Form Factor Pluggable — промышленный стандарт модульных компактных приемопередатчиков (трансиверов), используемых для передачи данных в телекоммуникациях обычно на скоростях до 2,5 Гбит/с

SFP+ является расширенной версией приемопередатчика SFP, способного поддерживать скорости передачи данных до 10 Гбит/с

SPM, Self-Phase Modulation — фазовая самомодуляция

SRS, Stimulated Raman Scattering — стимулированное рассеяние Рамана

Stage — стадия, ступень

TCM, Trellis Coded Modulation — модуляция с решетчатым кодированием

TDM, Time Division Multiplexing — мультиплексирование с временным разделением

TIA, TransImpedance Amplifiers — усилитель с конверсией сопротивления

TMN, Telecommunications Management Network — сеть управления телекоммуникациями

TTI, Trail Trace Identifier — идентификатор маршрута тракта

UNI, User-to-Network Interface — интерфейс пользователь-сеть

VCSEL, Vertical-Cavity Surface Emitting Laser — лазер вертикального излучения

WDM, Wavelength Division Multiplex — мультиплексирование с разделением каналов по длине волны

WSS, Wavelength Selective Switch — волновой селективный коммутатор

Xcode — вариант кодирования

XFP, 10G Small Form Factor Pluggable — протокол независимый оптический трансивер горячей замены, работающий на длинах волны 850 нм, 1310 нм или 1550 нм на скорости 10 Гбит/с в стандартах SDH, Gigabit Ethernet, 10 Gigabit Ethernet и др., включая каналы CWDM, DWDM

XPM, Cross-Phase Modulation — фазовая кросс-модуляция

ZDSF, Zero Dispersion Shifted Fiber — волокно со смещенной нулевой дисперсией

## ВВЕДЕНИЕ

Современные операторы сетей связи и провайдеры телекоммуникационных услуг заинтересованы в снижении затрат на передачу данных, а пользователи — в ускорении и упрощении доступа к услугам связи. Реализация требований пользователей часто приводит к перегрузке существующих сетей.

Внедрение новых широкополосных услуг мобильной и фиксированной связи, включая потоковое видео и доступ к социальным сетям, связанное с использованием новых приложений (облачные приложения) и интерактивных услуг, приводит к удвоению объемов передаваемых данных каждые два-три года. Простое расширение сетевой инфраструктуры (строительство новых оптических линий, увеличение количества оборудования) оказывается в этом случае неэффективным, т. к. сопровождается удорожанием обслуживания и эксплуатации сетей. Провайдеры и операторы телекоммуникационных сетей должны быть уверены в возможности эффективного масштабирования пропускной способности и производительности сетей, имеющих разнообразную топологию и покрывающих значительные территории, а пользователи телекоммуникационных услуг должны получить по своим запросам высококачественный сервис без существенного удорожания. При этом компромиссные решения могут иметь большую научно-техническую составляющую в новых технологиях оптических сетей и их организации.

Что же представляют собой новые направления технологических и организационных решений для оптических транспортных сетей? Известны до десятка таких направлений, которые можно считать самостоятельными, но можно объединять в группы.

1. Использование существующих волоконно-оптических линий для спектрального мультиплексирования CWDM и DWDM (Coarse Wavelength Division Multiplex — грубое мультиплексирование с разделением по длине волны; CWDM, Dense WDM — плотное WDM).

2. Использование оптических мультиплексоров выделения и ввода оптических каналов OADM (Optical Add-Drop Multiplexer) и ROADМ (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer) для развития гибкости и масштабируемости сети.

3. Использование спектральных оптических каналов для передачи статистически мультиплексируемых пакетных сообщений Ethernet, IP/MPLS.

4. Использование электронной TDM и оптической ОХС (Optical Cross-Connect) кроссовой коммутации в узлах оптической сети.

5. Увеличение пропускной способности спектральных каналов в системах с DWDM (от скоростей 2,5; 10; 40 Гбит/с) до 100, 400 Гбит/с и 1 Тбит/с за счет использования как новых типов волокон, так и новой элементной базы для цифрового кодирования, фазовой и амплитудно-фазовой оптической модуляции с сохранением стандартной сетки волн 0,8 или 0,4 нм между каналами и спектральной эффективностью модуляции от 0,4 бит/с/Гц до 4–8 бит/с/Гц. Применение гибкого распределения полосы частот оптического канала средствами технологии flex grid (гибкая сетка) в зависимости от запроса на поток нагрузки.

6. Использование цифровых циклических блоков оптической иерархии OTN/ОТН для гибкого размещения пользовательских данных и их гарантированной защиты процедурами коррекции ошибок FEC.

7. Составление схем/алгоритмов статического и динамического назначения рабочих и резервных маршрутов отдельных оптических каналов в сети. Использование алгоритмов оптимизации ресурсов оптической сети (обобщенное название *grooming*, не имеющее дословного перевода на русский язык), т. е. комплексное решение задач маршрутизации, назначения соединений, пропускной способности с использованием процедур сцепки цифровых блоков под единый информационный поток и т. д.

8. Увеличения дальности передачи и емкости каналов при использовании новых типов волокон, в том числе с множеством сердцевин MCF и малым числом мод FMF, малошумящих групповых и индивидуальных оптических усилителей, когерентного оптического приема, адаптивных электронных и оптических компенсаторов дисперсионных искажений.

9. Разработка схем организации оптических транспортных сетей, гарантирующих отказоустойчивость, как при одиночных, так и при двух- и трехкратных отказах линий или оборудования.

10. Реализация функций гибкого управления сетью и переход к функциям автоматически коммутируемых оптических транспортных сетей ASON (Automatic Switched Optical Network).

Большая часть перечисленных направлений совершенствования оптических транспортных сетей представлена главами учебного пособия. При этом основное внимание сконцентрировано на принципиально новых технических решениях, которые отражают сущность когерентных оптических сетей. Учебное пособие состоит из предисловия, введения, 12 глав, заключения, списка литературы и списка сокращений.

В первой главе рассматриваются принципы построения волоконно-оптических систем передачи: структура ВОСП, ВОСП-WDM и структура ВОСП когерентного типа с указанием преимуществ последней. Рассматриваются волоконные световоды для когерентных систем передачи и их характеристики. Показаны ограничения по пропускной способности волоконных световодов.

В главе 2 приводится материал по оптической транспортной иерархии последнего поколения (стандарты 2014/2015 гг.). Кратко рассматриваются пакет стандартов по новой телекоммуникационной технологии, схема мультиплексирования в ее цифровой и оптической составляющих, принципы упреждающей коррекции ошибок, сервисные возможности, функциональное построение оборудования для OTN/OTN и его сетевые возможности.

В главе 3 кратко рассмотрены структуры передатчиков и приемников оптических сигналов когерентных систем, способы модуляции оптического излучения, схемы и характеристики модуляторов, схемы и характеристики когерентных приемников оптических сигналов.

В главе 4 рассматривается формирование оптических сигналов в передатчиках: формирование оптических сигналов с фазовой, многоуровневой амплитудной и смешанной модуляцией; характеристики промышленных когерентных передатчиков (кодеры цифровых блоков). Дается оценка спектральной эффективности формирования оптических сигналов и проблемы при их передаче в оптических каналах.

В главе 5 рассматриваются принципы детектирования оптических сигналов в когерентных приемниках: способы построения фотодетекторов, характеристики промышленных

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)