100G DWDM-системы на Олимпиаде – еще выше, быстрее, сильнее!

Трещиков В.Н.,
к.ф.-м.н., генеральный директор компании Т8

Слепцов М.А.,
к.т.н., заместитель генерального директора по управлению проектами компании Т8

Кузьминов А.С.,
инженер I категории компании Т8

Леонов А.В.,
к.ф.-м.н., научный консультант компании Т8, info@t8.ru

DWDM-системы для Олимпийского Сочи

В рамках Программы по строительству объектов инфраструктуры связи к зимней Олимпиаде в Сочи специалистами компании Т8 на базе построенной сети ВОЛП была построена современная высокоскоростная DWDM-сеть, объединившая все крупные города и посёлки Краснодарского края. Общая протяжённость линий составила более 700 км, канальная скорость на разных участках — от 2,5 до 100 Гбит/с (рис. 1).

Для построения участков сети с канальной скоростью 100 Гбит/с использовалась когерентная DWDM-система "Волга" производства компании Т8. Участки с канальной скоростью 2,5 и 10 Гбит/с построены на каналообразующем оборудовании "Байкал" производства Т8 и оптических усилителях производства ИРЭ-Полюс.

Построенная сеть использовалась в качестве волоконно-оптической магистрали для крупнейшей в России сети транкинговой связи Тетра, которая обеспечивала связь олимпийских объектов. Услугами сети пользовались Оргкомитет Игр, Международный олимпийский комитет, работающие на играх волонтеры, транспортные службы, сотрудники транспортной безопасности.

Во время проведения Олимпиады и Паралимпиады в Сочи круглосуточно дежурила бригада специалистов компании Т8. Это гарантировало устранение сбоев телекоммуникационного оборудования в минимальные сроки, установленные требованиями Международного олимпийского комитета.

Успешное внедрение системы 100G на олимпийской сети показало высокий потенциал использования 100G DWDM-системы "Волга" для модернизации региональных

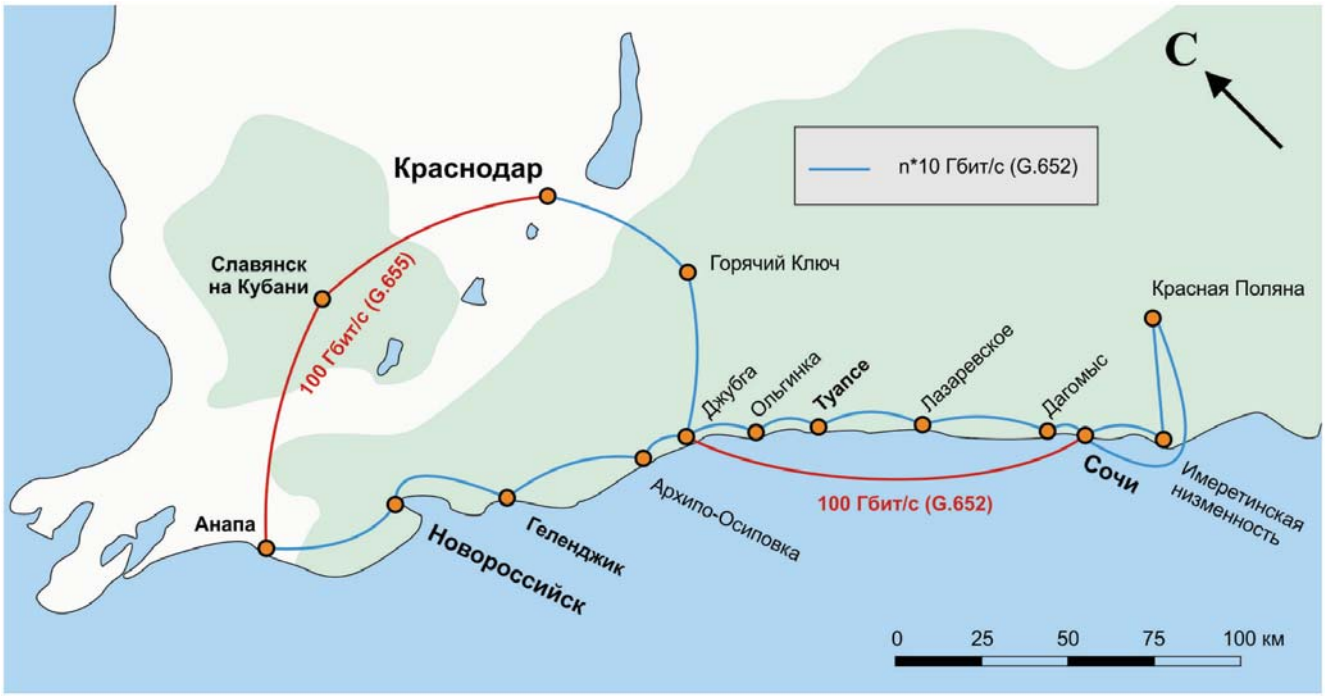

Рис. 1. Общая схема сетиDWDM в Краснодарском крае

сетей связи. Переход к когерентным каналам 100 Гбит/с позволяет в несколько раз повысить скорость передачи, сохранив при этом существующую кабельную инфраструктуру и расположение пунктов установки оборудования.

Описание сети

Упрощённая канальная схема построенной сети представлена на рис. 2. Когерентная DWDM-система "Волга" используется на участках "Краснодар — Славянск-на-Кубани — Анапа" и "Джубга — Сочи" общей протяжённостью более 350 км. На этих участках выполняется многоуровневая агрегация низкоскоростных потоков 2,5 и 10 Гбит/с в высокоскоростные оптические каналы 100 Гбит/с. Для этого на каждом из терминальных узлов установлен агрегатор 10x10G в 100G, позволяющий мультиплексировать 10 каналов 10G в один канал 100G. К одному из портов 10G подключен агрегатор 4x2,5G в 10G.

На некоторых участках, по запросу заказчика, в рамках магистральной транспортной сети были также отдельно организованы низкоскоростные каналы (например, уровня STM-1).

100G "Волга"

"Волга" — единственная российская DWDM-система с канальной скоростью 100 Гбит/с. Система может использоваться для построения магистральных и региональных высокоскоростных волоконно-оптических сетей связи. Общая пропускная способность достигает 9,6 Тбит/с (96 каналов по 100G) по одной паре оптических волокон.

"Волга" позволяет строить протяженные линии связи без компенсаторов дисперсии, с меньшим количеством усилителей и пунктов регенерации сигнала, чем для некогерентных систем 2,5/10/40G. Внедрение DWDM-системы "Волга" обеспечивает экономию капитальных затрат до 30% по сравнению с достижением той же емкости некогерентными технологиями.

Система "Волга" обладает рекордной чувствительностью: для уверенного приема сигнала 100G требуется отношение сигнал/шум всего 12,5 дБ. Такая чувствительность приемника позволяет успешно инсталлировать каналы 100G на старой сетевой инфраструктуре, строить линии связи большой протяженности.

DWDM-система "Волга" прошла государственную экспертизу

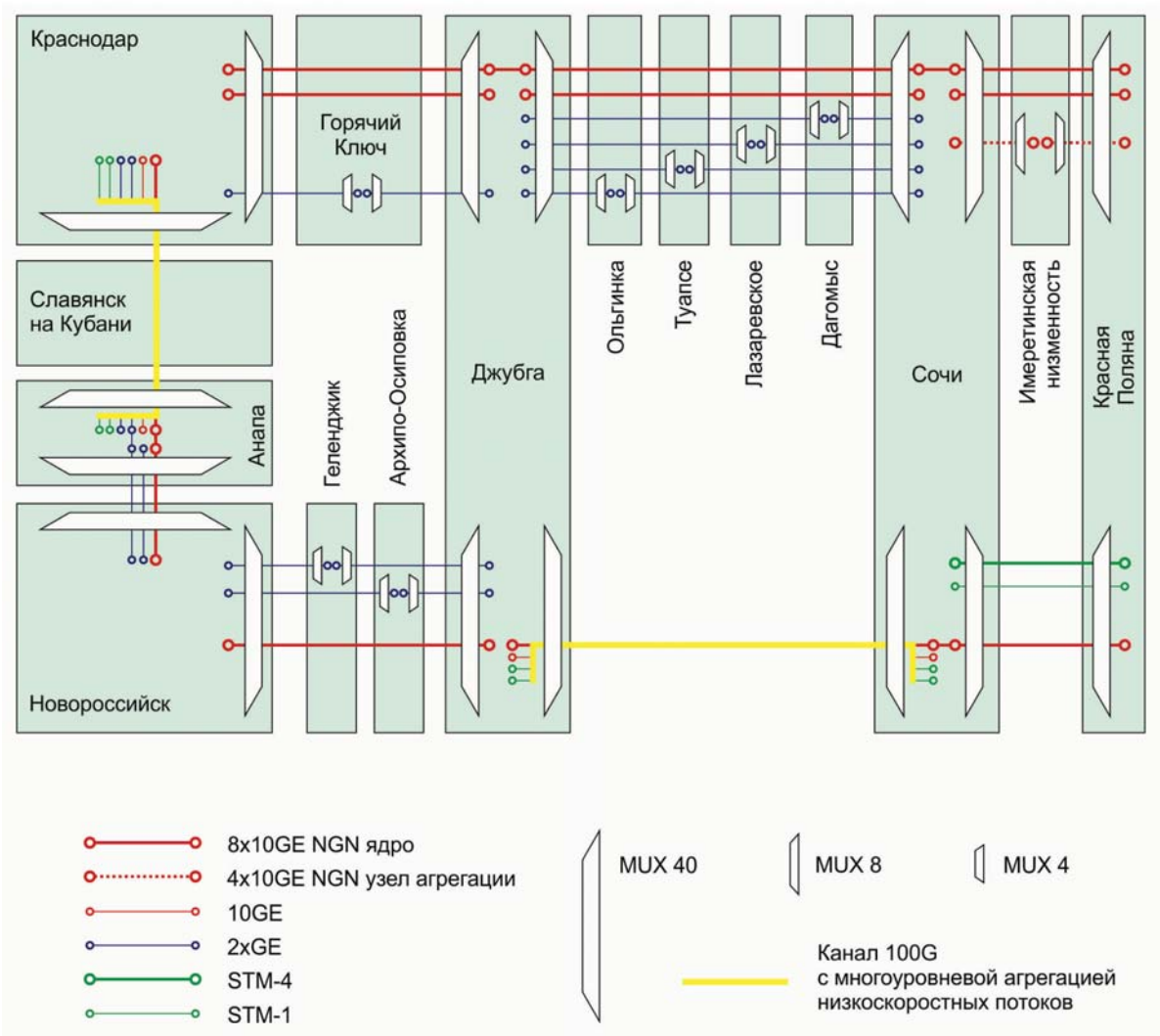

Рис. 2. Упрощённая канальная схема сети DWDM

Мировые рекорды системы "Волга"

В 2012 г. была продемонстрирована успешная работа многопролетной линии 100G в 80-канальной DWDM-системе протяженностью 4000 км на каскаде усилителей без использования регенерации сигнала и без применения компенсаторов дисперсии. В 2013 г. создана рекордная однопролетная линия 1T (десять каналов 100G) протяженностью 500 км без промежуточных пунктов, требующих электропитания. Это достижение является действующим мировым рекордом.

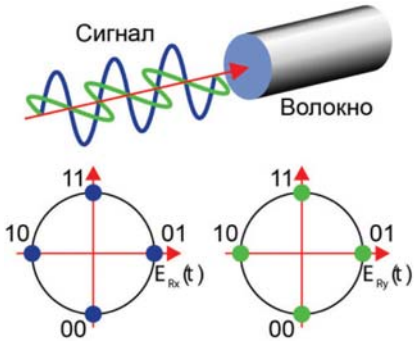

Рис. 3. Структура сигнала DP-QPSK

и внесена в реестр инновационной продукции, рекомендованной к закупкам в рамках № 94-ФЗ и № 223-ФЗ. К 2014 г. сотрудниками компании "Т8" построено более 50 тыс. км DWDM-сетей, из них почти 10 тыс. км — на 100G DWDM-системах "Волга".

Увеличение скорости 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). Благодаря этому, многие пользователи DWDM-систем привыкли, что переход к более скоростным каналам означает с точки зрения эксплуатации лишь повышение общей ёмкости системы, без изменения дальности.

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, "комфортные" (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. Все эти способы по-разному влияют на эксплуатационные характеристики DWDM-систем. Ключевыми параметрами для корректного сравнения DWDM-систем становятся не число каналов и канальная скорость, а спектральная эффективность и ширина используемого диапазона.

Современные системы 100G используют модуляцию DP-QPSK, что означает "две поляризации, четыре возможных состояния сигнала в каждой". Каждое состояние сигнала QPSK несёт два бита информации, таким образом, каждый символ DP-QPSK несёт четыре бита (рис. 3).

При символьной скорости 25 Гбод, скорость канала с сигналом в формате DP-QPSK составляет 100 Гбит/с. В существующих коммерческих системах, канал 100G занимает полосу 50 ГГц, т.е. спектральная эффективность составляет 2 бит/с/Гц. Возможно уплотнение каналов и передача трёх каналов 100G в полосе 100 ГГц, разработку такой системы (со спектральной эффективностью 3 бит/с/Гц) в настоящее время ведёт "Т8" при поддержке Фонда Сколково.

Для повышения канальной скорости может использоваться и другой способ — переход на более сложные форматы модуляции, которые позволяет передавать больше бит информации за один символ. Например, можно использовать модуляцию DP-16QAM, что означает "две поляризации, 16 возможных состояний сигнала в каждой". Каждое состояние сигнала 16QAM несёт четыре бита информации, таким образом, каждый символ DP-16QAM несёт восемь бит. В начале 2014 г. ведущими производителями был продемонстрирован ряд решений с двумя поднесущими 200G и сигналом в формате DP-16QAM в полосе 75...100 ГГЦ с символьной скоростью 25 Гбод на каждой поднесущей. Спектральная эффективность этих решений составляет 4...5,33 бит/с/Гц.

При сравнении экономической эффективности DWDM-систем необходимо учитывать не только спектральную эффективность, но и дальность передачи (максимальную длину регенерационного участка). Как было отмечено выше, переход к более сложным форматам модуляции влечёт за собой существенное снижение дальности передачи.

Дальность передачи определяется порогом чувствительности

приёмника (дБ): при каком отношении уровня полезного сигнала к уровню шума в линии он ещё способен принять и расшифровать поступающий сигнал. Это важнейшая характеристика оборудования, от которой напрямую зависит максимальная дальность регенерационного участка (т.е. участка на каскаде усилителей, без регенерации сигнала). В технике связи этот параметр оборудования называется "требуемое отношение сигнал-шум" ("требуемый OSNR"). Чем ниже порог чувствительности приёмника — тем лучше. На таком оборудовании можно строить более протяжённые линии связи без регенерации сигнала.

При переходе к более высоким форматам модуляции, порог чувствительности приёмника неизбежно ухудшается (возрастает). Это можно пояснить на основе графического изображения форматов модуляции QPSK и 16QAM (рис. 4). Чем плотнее расположены возможные состояния сигнала в фазовом пространстве, тем меньше допустимый уровень шума, который может быть накоплен при распространении сигнала в линии.

Таким образом, спектральная эффективность систем с плотным расположением каналов 100G лишь незначительно уступает спектральной эффективности существующих решений 2x200G. Это означает, что при одной и той же ширине используемого спектрального диапазона, ёмкость систем будет различаться незначительно. При этом системы на основе 100G-каналов в формате DP-QPSK существенно превосходят системы с модуляцией DP-16QAM по произведению максимальной ёмкости на дальность передачи.

Для увеличения пропускной способности DWDM-систем могут применяться и другие способы, например, расширение используемого спектрального диапазона или использование многосердцевинных волокон. И то, и другое требует 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.Эти варианты могут рассматриваться при строительстве новых линий связи, но практически неприменимы для модернизации существующей инфраструктуры.

Таким образом, когерентные DWDM-системы 100G на основе модуляции DP-QPSK являются наиболее экономически эффективным решением для построения или модернизации магистральных линий связи, на сегодняшний день и в ближайшей перспективе.

Необходимо подчеркнуть, что возможность уплотнения DWDM-каналов возникла благодаря использованию когерентных оптических технологий, которые позволяют использовать суперканалы. А именно, оптические мультиплексоры/демультиплексоры управляют не отдельными каналами, а наборами каналов в стандартной полосе (например, 3 канала в полосе 100 ГГц), а нужный оптический канал на стороне приёмника выделяется непосредственно транспондером.

Важную роль при развитии DWDM-систем играет не только развитие транспортной технологии, но и расширение набора предоставляемых сервисов, а также доступных клиентских интерфейсов. Сегодня пришло время транспортных DWDM-сетей, которые не просто обеспечивают передачу разнородного трафика (IP, SDH, Ethernet от аппаратуры различных производителей), но и предоставляют операторам связи максимальные удобства в управлении и коммутации информационных потоков.

Новые потребности операторов связи предъявляют требования к аппаратуре по поддержке стандарта OTN, агрегации и коммутация каналов. Ранее большая часть DWDM-систем строилась по прозрачной схеме, когда каждому клиентскому каналу выделялась отдельная длина волны. С появлением электрических агрегаторов (мукспондеров) стало возможно осуществлять электрическое объединение 4-8 клиентских сигналов и передавать их в одном спектральном канале, со скоростью 10G или 100G. Объединяя агрегаторы разных уровней, можно осуществлять многоуровневую агрегацию низкоскоростных клиентских каналов в высокоскоростные когерентные 100G-каналы. Это позволяет уменьшить число спектральных каналов в DWDM-системе и использовать меньше дорогих стабилизированных лазеров.

Сегодня типовое число каналов в DWDM-системах России увеличилось до 40, есть запросы и на 80-канальные системы. Это ведёт к необходимости использования многоканальных мультиплексоров AWG, изменения укладки оптических патч-кордов и механической компоновки шасси. Эти две основные причины, а также внедрение OTN, разработки транспондеров 40Gи 100G, ROADM и универсального коммутатора к

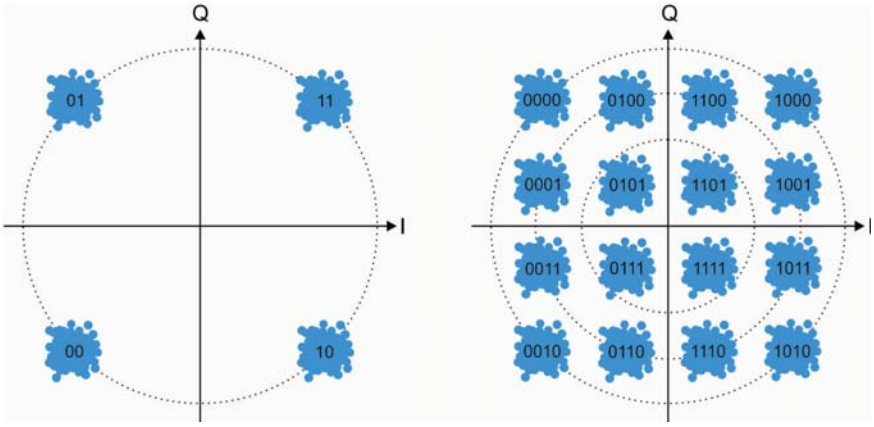

Рис. 4. Форматы модуляции QPSK и 16QAM.
Возможные состояния сигнала в фазовом пространстве

2012 году привели компанию "Т8" к необходимости выпуска нового поколения аппаратуры — 100G DWDM-системы "Волга", которая была успешно применена для проекта "Сочи-2014" и продолжает активно развиваться в настоящее время.

Шасси, карты и интерфейсы системы "Волга"

Шасси платформы "Волга" выпускается в четырех форм-факторах: 10U (13 слотов для интерфейсных карт), 6U (семь слотов), 3U (три слота)и 1U (эквивалент одного слота). В шасси могут устанавливаться карты транспондеров и мукспондеров 2,5/10/40/100G, а также усилители EDFA и RAU, мультиплексоры ввода-вывода каналов ROADM.

Транспондер обеспечивает "прозрачную" передачу клиентского канала по оптическому DWDM-каналу, например 100GE по OTU4. Мукспондер (агрегатор) обеспечивает передачу нескольких клиентских каналов по одному оптическому DWDM-каналу. Например, восемь клиентских каналов GE/STM-1/4/16 собираются в поток 10 Гбит/с (OTU2) или десять каналов 10GE/STM-64/OTU2- в поток 100 Гбит/с (OTU4). Комбинация мукспондеров разных уровней позволяет обеспечить многоуровневую агрегацию низкоскоростных потоков в любой конфигурации.

Транспондеры и мукспондеры DWDM-системы "Волга" поддерживают полный спектр клиентских интерфейсов, необходимых операторам связи:

- SDH STM-1/4/16/64/256;
- 100M/1/10/100 Gigabit Ethernet;
- FiberChannel;
- OTN OTU1/2/3/4;
- InfiniBand.

Шасси высотой 3/6/10U и глубиной 300 мм предназначены для установки в стойку 19/21" и имеют два резервированных блока питания (650, 850 или 1200 Вт). Блоки оптической коммутации позволяют создавать сети с резервированием 1+1 и кольцевыми схемами. В одном шасси можно разместить DWDM-оборудование ёмкостью до 700 Гбит/с, в одной 19" стойке — до 5 Тбит/с.

Шасси 3U

Привлекательное решение для региональных операторов — шасси "Волга" высотой 3U, в котором можно установить три интерфейсных карты. Шасси может использоваться в различных конфигурациях:

- формирование до 3 DWDM-каналовна разных длинах волн (пример конфигурации: три транспондера 100G);
- многоуровневая агрегация низкоскоростных потоков (пример конфигурации: мукспондер "4xSTM-16 в 10G", мукспондер "8xGE в 10G" и мукспондер "10x10G в 100G");
- усилительный пункт (пример конфигурации: два линейных усилителя EDFA и блок ввода-вывода служебного канала).

Шасси 1U

Компактная версия DWDM-системы "Волга" высотой 1U поставляется с фиксированным набором интерфейсов, соответствующим любой карте из линейки оборудования "Волга" (транспондеры и мукспондеры 100/40/10/2,6 Гбит/с, EDFA, RAU, ROADM). Это полноценная DWDM-система для стандартной стойки 19", которая включает в себя систему управления, систему охлаждения с "горячей" заменой блока вентиляции, два блока питания по 250 Вт. Система может эффективно использоваться в ограниченном пространстве (базовые станции 4G/LTE, офисы, чердачные помещения и т.п.).

Работа каналов 100G в окружении 10G

Внедрение систем 100G в России имеет свою специфику. Большинство магистральных сетей заполнено трафиком с канальной скоростью 10 Гбит/с, и при добавлении в такую систему 100-гигабитных каналов происходит значительное искажение сигнала 100G от соседних каналов 10G. Это существенно ограничивает использование DWDM-систем, характеристики которых, как правило, рассчитываются и указываются в спецификации без учета помех от соседних каналов.

Специалистам Т8 в 2013 г. удалось заметно улучшить характеристики канала 100G при работе в окружении каналов 10G за счет быстрой настройки параметров на оптическом приемнике. Благодаря применению новой технологии обработки 100G-сигнала чувствительность приемника возросла более чем в два раза.

Таким образом, DWDM-система "Волга" адаптирована к тем условиям, в которых ей приходится работать на российских сетях. Это решение заметно улучшает характеристики системы и позволяет осуществлять эффективный апгрейд старых 10G сетей новым 100G оборудованием.

Рис. 5. Внешний вид универсальных шасси "Волга" компании Т8: 10U — 13 слотов (a), 6U — 7 слотов (b), 3U — 3 слота (c), 1U — эквивалент 1 слота (d)