

OTN В СЕТЯХ СВЯЗИ: современные тенденции

В.Конышев, к.ф.-м.н., ведущий инженер ООО "Т8"

А.Леонов, к.ф.-м.н., заместитель начальника
научно-исследовательского отдела ООО "Т8"

М.Слепцов, к.т.н., заместитель генерального директора
по управлению проектами ООО "Т8"

УДК 621.391.004

Технология OTN, сменившая SDH/SONET, на сегодняшний день стала основной технологией построения магистральных волоконно-оптических сетей связи.

СМЕНА ТЕХНОЛОГИЙ

Аббревиатура OTN расшифровывается как Optical Transport Network – оптическая транспортная сеть. Она стандартизирована сектором телекоммуникаций Международного союза электросвязи (МСЭ-T) в декабре 2009 года в рекомендации G.709 Interfaces for the Optical Transport Network.

Исторически в телекоммуникациях развивались два типа технологий: ориентированные на передачу каналов: синхронные (SDH) и асинхронные (ATM); ориентированные на передачу пакетов: Ethernet/IP. Технологии первого типа гарантируют доставку трафика между терминальными узлами сети за фиксированное время, однако требуют использования более сложного и дорогостоящего оборудования и более уязвимы к повреждениям оборудования в узлах сети. Пакетные технологии более просты, дешевы и устойчивы к атакам на промежуточные узлы, однако их имманентным свойством является механизм сброса пакетов, который регулирует скорость обмена данными между подключенными к сети устройствами. Задача повторной отправки утерянных пакетов возложена на клиентское оборудование и регулируется алгоритмами протокола TCP.

На протяжении последних двух десятков лет доля технологий первого типа (SDH, ATM) на сетях связи неуклонно снижается, а второго типа (Ethernet/IP) – возрастает. Развитие SDH остановилось на скорости 40 Гбит/с (STM-256), ATM – на скорости 10 Гбит/с. В то же время, пакетные

технологии динамично развиваются: успешно применяется 100 Гбит/с Ethernet, в 2017 году ожидается стандартизация технологии 400 Гбит/с Ethernet, в разработке находится стандарт 1 Тбит/с Ethernet. Однако клиентское оборудование до сих пор использует оба типа технологий.

Необходимость передачи по магистральным сетям скоростного трафика разных форматов (SDH, Ethernet/IP и др.) стала одной из основных предпосылок для разработки технологии OTN. Ее принцип (рис.1) заключается в том, что сигналы различных форматов упаковываются в стандартные контейнеры, которые затем передаются по волоконно-оптической сети [1]. Таким образом обеспечивается возможность передачи по транспортной сети любых необходимых типов клиентских сигналов (IP, STM, ATM, Fibre Channel, InfiniBand и др.), а также эффективное использование пропускной способности за счет плотной упаковки разнородного трафика.

В заголовки контейнеров может добавляться служебная информация, которая позволяет контролировать прохождение трафика по сети и обнаруживать ошибки работы, а также избыточное кодирование (FEC), которое позволяет восстанавливать поврежденный трафик без необходимости его повторной передачи. Технология коррекции ошибок FEC, применяемая в сетях OTN, позволяет успешно восстанавливать переданный сигнал даже после существенных искажений и затуханий, что дает возможность строить оптоволоконные магистрали OTN протяженностью

Иерархия контейнеров OTN в упрощенном виде

OTN-контейнер	Полезная скорость	Применение	
		Транспорт	Мультиплексирование
ODU-0	1,25 Гбит/с	STM-1/4, Gigabit Ethernet, Fibre Channel	–
ODU-1	2,5 Гбит/с	STM-16, 2 Gigabit Fibre Channel	2 ODU-0
ODU-2	10 Гбит/с	STM-64, 10 Gigabit Ethernet, 10 Gigabit Fibre Channel	8 ODU-0 4 ODU-1
ODU-3	40 Гбит/с	STM-256, 40 Gigabit Ethernet	32 ODU-0 16 ODU-1 4 ODU-2
ODU-4	100 Гбит/с	100 Gigabit Ethernet	80 ODU-0 40 ODU-1 10 ODU-2 2 ODU-3
ODU-FLEX	N*1,25 Гбит/с	EPON, GPON, InfiniBand, CPRI и др.	

в тысячи километров. Стандартизированные скорости на уровне ODU приведены в таблице.

СТРУКТУРА КОНТЕЙНЕРА И СКОРОСТЬ В СЕТИ

Контейнер OTN строится путем добавления к исходным клиентским данным нескольких заголовков, каждый из которых выполняет свою функцию.

Во-первых, клиентский трафик разбивается на части нужного размера, после чего к каждой из них добавляется заголовок, описывающий тип трафика. Получившийся блок информации называется OPU – Optical Payload Unit, оптический блок нагрузки. Блок OPU передается в неизменном виде из конца в конец сети, от точки приема клиентских данных до точки выдачи этих данных клиенту.

Во-вторых, к блоку OPU добавляется служебная информация, необходимая для мониторинга прохождения сигнала по сети и управления процессом передачи сигнала. Получившийся блок информации называется ODU – Optical Data Unit, оптический блок данных. Блок ODU также передается в неизменном виде из конца в конец сети, от точки приема клиентских данных до точки выдачи этих данных клиенту.

В-третьих, к блоку ODU добавляется избыточное кодирование (FEC) и дополнительная служебная информация – для мониторинга, контроля и восстановления трафика на отдельном сегменте сети между двумя транспондерами. Получившийся блок информации называется OTU – Optical Transport Unit, оптический транспортный блок. Блок

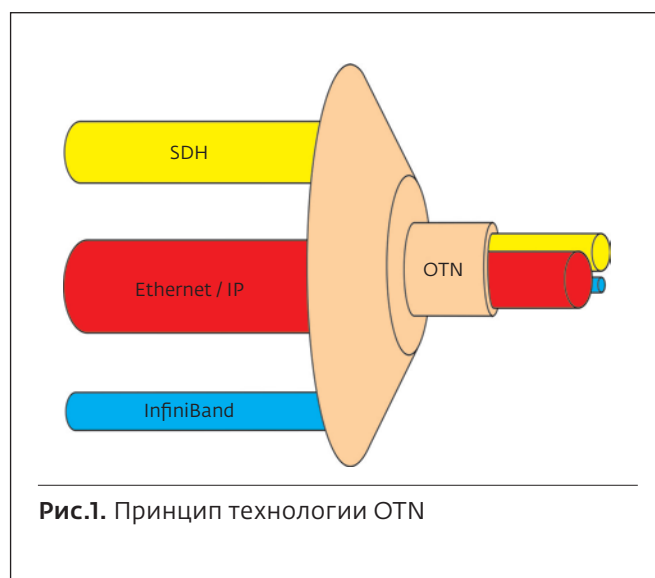
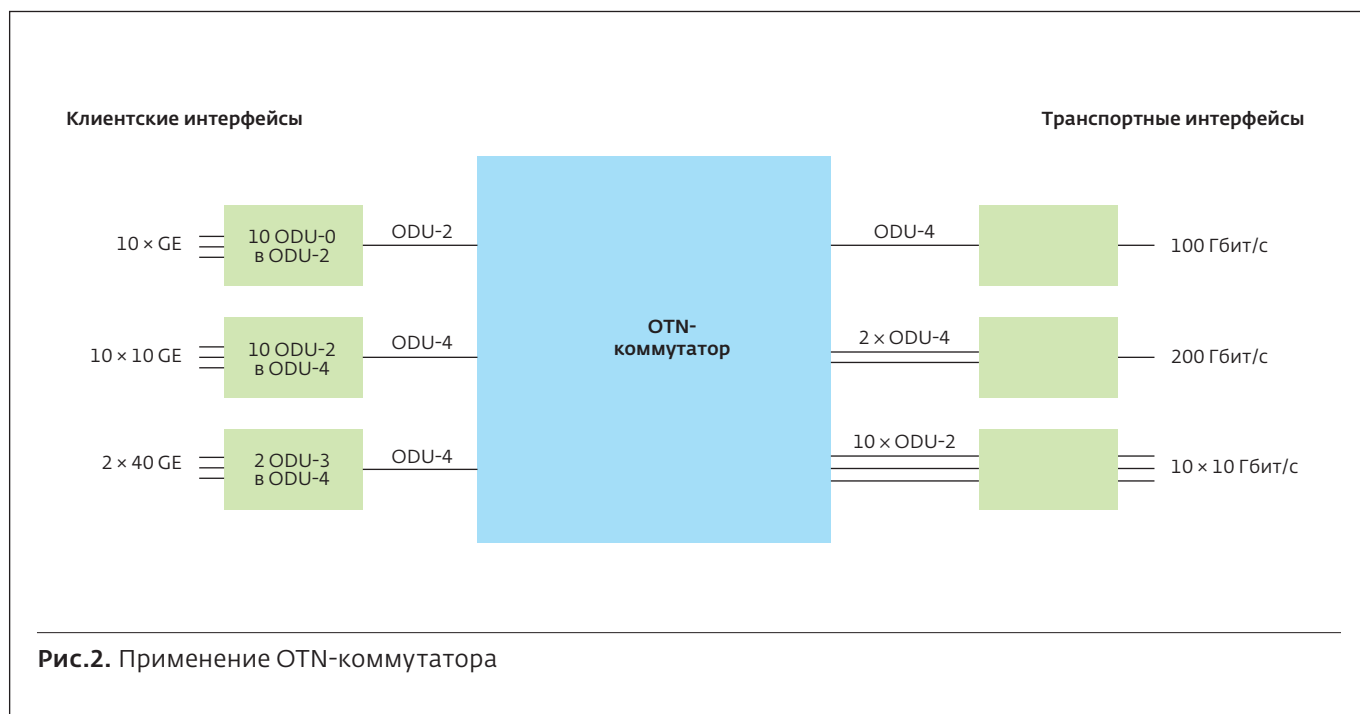


Рис.1. Принцип технологии OTN



OTU передается в неизменном виде в пределах участка сети, ограниченного транспондерами (т.е. пунктами, где сигнал преобразуется в электронный вид для 3R-регенерации).

Таким образом, по сети OTN передаются контейнеры OTU, каждый из которых представляет собой "матрешку", где под несколькими слоями служебных данных скрывается исходный клиентский сигнал. Можно сказать, что клиентский сигнал "завернут" в несколько слоев служебных данных, поэтому технологию OTN называют также "digital wrapper technology", или "optical channel wrapper" (от англ. wrapper – обертка).

Полный перечень стандартизированных контейнеров на уровнях OTU и ODU и точные значения скоростей можно найти в документах МСЭ-Т.

ТРАНСПОРТ И МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕ

Изначально в стандарте OTN предполагалась передача внутри контейнера только соответствующего клиентского сигнала ("прозрачный" транспорт). Например, в ODU-2 мог передаваться либо сигнал STM-64, либо сигнал 10 Gigabit Ethernet. Впоследствии было принято дополнение, которое стандартизировало возможность OTN-мультиплексирования, т.е. передачи в контейнере более высокого уровня нескольких контейнеров более низкого уровня со смешанным клиентским трафиком. Таким образом, ODU-2 стало возможным использовать, например, для передачи

четырех контейнеров ODU-1, в трех из которых передается клиентский трафик STM-16, а в четвертом – два ODU-0 с клиентским трафиком Gigabit Ethernet в каждом.

Современные сети связи построены в основном с использованием мукспондеров – устройств, которые объединяют несколько низкоскоростных клиентских каналов в один высокоскоростной OTN-канал с использованием OTN-мультиплексирования. На начальном этапе развития OTN-сетей OTN-мультиплексирование позволяло наиболее эффективно использовать имеющуюся пропускную способность и широко применялось операторами связи. По мере развития этих сетей и перехода к все более скоростным каналам (ODU-4 и в перспективе выше) проявились недостатки такой архитектуры: громоздкость (необходимость использования мукспондеров двух или даже трех уровней) и необходимость ручной перекоммутации для изменения структуры трафика [2]. Так, для передачи клиентских каналов Gigabit Ethernet (GE) в составе скоростного канала 100 Гбит/с требуется использовать по меньшей мере, два уровня мукспондеров: один для агрегации GE в уровень ODU2 (10 Гбит/с), второй – для агрегации ODU2 в ODU4 (100 Гбит/с). При этом внутри каждого мукспондера процесс выполняется в несколько этапов: GE→ODU-0→ODU-1→ODU-2; ODU-2→ODU-3→ODU-4. Если в какой-то момент

оператору связи потребуется переключить данный канал GE в другой высокоскоростной канал 100 Гбит/с (например, с целью оптимизации загрузки скоростных каналов разнородным трафиком), нужно будет вручную перекоммутировать патчкорды.

Объективные ограничения OTN-мультиплексирования и необходимость дальнейшего развития транспортных сетей привели к внедрению OTN-коммутации.

Коммутация

Термин "OTN-коммутация" (OTN X-Connect) означает возможность произвольно перераспределять OTN-трафик между различными портами одного устройства на уровне отдельных контейнеров ODU. Например, терминальный OTN-коммутатор позволяет оператору управлять распределением трафика клиентских портов по транспортным каналам. При этом каждый клиентский порт больше не связан жестко с определенным транспортным каналом (как в мукспондере): трафик можно перебрасывать на любой транспортный интерфейс через систему управления либо вообще настроить автоматическое перераспределение трафика в зависимости от загрузки каналов (рис.2).

Эффективное использование полосы перспективных "суперканалов" (400 Гбит/с, 1 Тбит/с и др.) возможно только с использованием OTN-коммутаторов. Ручная коммутация мукспондеров не позволяет эффективно управлять загрузкой такой полосы, оперативно перестраивать структуру трафика в зависимости от потребностей клиентов и загрузки транспортной сети [2].

Еще более многообещающая идея – использование OTN-коммутаторов в промежуточных узлах транспортной сети. Это позволит динамически распределять по различным сетевым маршрутам множество низкоскоростных контейнеров OTN, имеющих разные источники генерации и терминирования.

OTN и SDH, DWDM, ROADM

Технология OTN является, по сути, развитием технологии SDH. Ограниченность SDH и моральное устаревание этой технологии стали проявляться особенно ярко по мере развития IP-сервисов и колоссального роста IP-трафика в сетях передачи данных. На протяжении последних 15 лет трафик в развитых странах растет ежегодно в среднем на 50%, основные драйверы роста – видеоконтент и улучшение

клиентского доступа (развитие сетей проводного и беспроводного широкополосного доступа – PON и LTE) [3].

Технологическим ответом на рост трафика стало внедрение когерентных каналов 40G и 100G. В 2013–2014 гг. ведущими операторами связи Северной Америки осуществлен переход на 100G как основные транспортные каналы магистральных DWDM-сетей (так называемая перезагрузка оптических сетей – optical reboot), и сегодня это стало общемировой тенденцией. Все современные транспортные DWDM-системы со скоростью канала 100G и выше построены на технологии OTN, все современные транспортные процессоры со скоростью 100G (Acacia, NEL, CivCom и др.) базируются на ней. Активно ведется разработка DWDM-систем со скоростями 200G, 400G и выше по одной несущей. Коммерческие системы 2x200G представлены ведущими производителями в 2015 – начале 2016 года, системы 400G и 600G по одной несущей анонсированы на 2017 год.

Развитие SDH-сетей остановилось в мире на уровне 40G, в России – на уровне 10G. Стандартизация и внедрение более современной технологии транспортных сетей OTN сделали дальнейшее развитие SDH-оборудования неактуальным. При этом технология OTN позволяет передавать "внутри" OTN-фреймов любые виды клиентского трафика, в том числе и трафик SDH. Таким образом, при переходе к OTN как базовой транспортной технологии весь трафик SDH передается внутри OTN-контейнеров с сохранением всех требуемых характеристик качества обслуживания. Для пользователя смена транспортной технологии проходит незаметно.

В России, как и во всем мире, активно ведется внедрение каналов 100G на магистральных сетях. В частности, с использованием оборудования отечественного производства ("T8") в стране уже построено более 10 тыс. км DWDM-сетей. Необходимо, однако, отметить, что транспортные процессоры для обработки когерентного оптического сигнала 100G и выше (DSP, Digital Signal Processor) не производятся в России, а логика их работы засекречена производителями. Для эффективного использования 100G-оборудования в задачах, связанных с национальной безопасностью, необходимо выполнить разработку и создание отечественного когерентного DSP-процессора.



Еще раз напомним, технология OTN обычно используется вместе с технологией спектрального уплотнения (DWDM). При этом по одному волокну передаются одновременно несколько каналов OTN на разных длинах волн. На сегодняшний день ведущие производители магистрального оптического оборудования предлагают DWDM-системы, которые обеспечивают передачу до 96 каналов по одному волокну с полезной скоростью в каждом канале до 100 Гбит/с (OTU4). Ведется разработка перспективных DWDM-систем с целью увеличения количества каналов (до нескольких сотен) и повышения скорости в каждом канале (до 200 Гбит/с, 400 Гбит/с и выше). Связка технологий OTN и DWDM сегодня является типовым, наиболее распространенным решением для построения оптоволоконных магистралей, которое активно развивается и будет применяться в долгосрочной перспективе.

Для управления отдельными длинами волн в сети DWDM (например, их перенаправления на тот или иной маршрут) могут использоваться перестраиваемые оптические мультиплексоры ввода-вывода (ROADM, reconfigurable optical add-drop multiplexer). ROADM-коммутация может применяться одновременно с OTN-коммутацией. ROADM позволяет управлять потоками данных на уровне оптических каналов (длин волн), например, перенаправляя поток 100 Гбит/с по тому или иному маршруту транспортной сети. OTN-коммутация позволяет управлять потоками данных на уровне отдельных контейнеров ODU (т.е. от 1,25 Гбит/с), например, перенаправляя низкоскоростные потоки клиентских данных на тот или иной скоростной оптический канал.

OTN и IP MPLS

Технология OTN незаменима при построении современных сетей транспортного уровня, где используются оптические усилители сигнала. Оптический эрбиевый усилитель (EDFA) вносит в линию шум спонтанной эмиссии (ASE-шум), который резко увеличивает уровень битовых ошибок (BER) в линии. Технология OTN позволяет обрабатывать такой сигнал благодаря мощным встроенным механизмам коррекции ошибок. Кодирование FEC в сети OTN позволяет восстанавливать даже сильно искаженный и зашумленный сигнал, снижая частоту ошибок на десять порядков: с 10^{-2} до 10^{-12} .

В сетях IP MPLS применяется существенно более примитивная технология циклических

сумм (CRC), которая не позволяет восстановить поврежденный трафик, а лишь проверяет целостность данных. Поврежденные пакеты при этом сбрасываются. Протокол TCP не способен различить сброс пакетов вследствие превышения пропускной способности сети и сброс поврежденных пакетов, воспринимая любой сброс пакетов как указание на необходимость снизить скорость передачи. Таким образом, в зашумленной линии скорость передачи IP-трафика оказывается неоправданно низкой.

В то же время для сетей связи небольшого масштаба (городская, корпоративная), где не используются усилители (грубо говоря, при протяженности линий менее 40 км), можно рассматривать два варианта построения: на основе технологии Ethernet (на коммутаторах IP MPLS) и на основе оборудования DWDM/OTN с поддержкой различных форматов клиентских сигналов (включая и Ethernet). В штатном режиме работы оба варианта способны обеспечить примерно одинаковую функциональность. Однако, по мнению многих операторов связи, технология OTN даже для небольших сетей выглядит предпочтительнее по ряду причин.

Во-первых, сети IP MPLS строятся в расчете на среднюю загрузку, а не на максимальную; при превышении трафиком пропускной способности сети избыточные пакеты сбрасываются. Также пакеты сбрасываются в случае ошибок при передаче. В сетях OTN сброс пакетов не предусмотрен в принципе: все данные, поступившие на входной порт канала OTN, гарантированно передаются на выходной порт. В случае возникновения ошибок при передаче в сети OTN происходит восстановление пакета благодаря использованию избыточного кодирования.

Во-вторых, время доставки пакета в сети IP MPLS не гарантируется, а в сети OTN передача трафика происходит с жесткой привязкой к тактовым частотам, и таким образом время доставки пакетов между портами сети строго детерминировано.

Наконец, в силу изначальной ориентированности на магистральные транспортные сети возможности мониторинга и управления трафиком для сетей OTN развиты в существенно большей степени, чем для IP MPLS. Возможен вывод детальной статистики о состоянии портов и сервисов в режиме реального времени, анализ и визуализация трафика. При этом сети IP MPLS предполагают более простой функционал мониторинга и управления.

Таким образом, хотя технологии OTN и IP MPLS для небольших сетей близки по своим параметрам, гарантированная доставка разнородного трафика и наличие кодирования FEC делают технологию OTN/DWDM более предпочтительной для реализации критичных приложений транспортного уровня. Важным преимуществом представляются и широкие возможности расширения полосы ($N \cdot 100$ Гбит/с по паре волокон, где N уже сегодня типично достигает 96), недостижимые в сетях IP MPLS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Технология OTN сменила SDH/SONET в качестве основной транспортной технологии магистральных оптических сетей связи. В комбинации с технологией спектрального уплотнения DWDM она позволяет организовать линии связи с пропускной способностью до 10 Тбит/с по паре волокон (в перспективе, по мере развития существующих технологий, – до 100 Тбит/с).

На первых этапах внедрения технология OTN использовалась для транспорта и мультиплексирования клиентских потоков данных, а в настоящее время активно развивается также применение OTN-коммутации, которая в комбинации

с технологией ROADM позволяет эффективно управлять пропускной способностью сетей связи на уровнях от отдельных контейнеров ODU (1,25 Гбит/с) до отдельных оптических несущих (200 Гбит/с, в ближайшей перспективе – 400 Гбит/с).

В качестве оптимальной архитектуры сети, вероятно, следует рассматривать связку OTN/DWDM и IP MPLS, где OTN/DWDM используется как базовая транспортная технология (опорная сеть связи уровня $N \cdot 100$ Гбит/с), а IP MPLS – как массовая технология построения клиентских сетей, обеспечивающая интеграцию низкоскоростных пользовательских интерфейсов, коммутацию и маршрутизацию клиентского трафика.

ЛИТЕРАТУРА

1. Власов И.И., Сладких Д.В. Что такое OTN? // Вестник Связи. 2008. № 1. С. 81–85.
2. Schmitt Andrew. Интегрированная OTN-коммутация виртуализирует оптические сети // Infonetics Research. June. 2012.
3. Конышев В.А., Леонов А.В., Наний О.Е., Трещиков В.Н., Убайдуллаев Р.Р. Оптическая революция в системах связи и ее социально-экономические последствия // Прикладная фотоника. 2016. Т. 3. № 1. С. 15–27.

