

## СТАНДАРТЫ ВНУТРИОБЪЕКТОВОГО МНОГОМОДОВОГО ВОЛОКНА: ЧТО НОВОГО?

Дж.Камино, RCDD, глава подразделения по разработке оптоволоконной продукции компании OFS

УДК 681.7.068 / ВАК 05.09.02; DOI: 10.22184/2070-8963.2019.80.3.42.47

Возрастающая потребность в пропускной способности внутриобъектовых сетей предприятий и ЦОД, облачных вычислений и веб-сервисов продолжает быть стимулом к увеличению скорости передачи с 1–10 Гбит/с до 40, 100 Гбит/с и выше. Многомодовое оптическое волокно (ММ ОВ) сегодня успешно справляется с задачей передачи данных на типичные для указанных приложений расстояния, при этом оно продолжает эволюционировать для удовлетворения еще больших потребностей в скорости и емкости. Приводится информация о новых разработках ММ ОВ, доступных технологиях связи в этом сегменте рынка, а также о развитии соответствующих стандартов.

### РЫНОК МНОГОМОДОВОГО ОВ ПРОДОЛЖАЕТ СТРЕМИТЕЛЬНО РАЗВИВАТЬСЯ

По данным индекса Cisco Visual Networking Index за 2017 год объем IP-трафика по всему миру ежегодно увеличивается на 24%. Согласно исследованию 2018 Cisco Global Cloud Index ожидается рост объема мирового трафика ЦОДов с 6,8 ЗБ (2016 г.) до 20,6 ЗБ (2021 г.). Повсеместно существует потребность в высокоскоростных сетях, а, следовательно, в больших объемах оптического волокна (ОВ).

Еще одно интересное наблюдение: количество потребляемого трафика в пределах ЦОД в пять раз выше, чем при передаче данных от него клиенту. Межсетевой трафик ЦОД составляет 85% от общего потребления трафика. Вот почему существует потребность в более высокой скорости соединения внутри ЦОД и большем количестве линий между серверами и коммутаторами.

Общеизвестно, что данные из ЦОД передаются в облачное хранилище. Но что точно это значит?

Очевидный ответ состоит в том, что некоторые предприятия мигрируют к облачным хранилищам таких гигантов, как Google, Microsoft, Amazon и др., однако возможны и другие подходы. Собственные облачные хранилища компаний также способны предоставлять своим пользователям аналогичные услуги. Возможны и комбинированные варианты с использованием обоих указанных подходов. Cisco прогнозирует, что корпоративное облако, доминирующее сегодня на рынке, будет продолжать расти в течение всего периода исследования, отражая уход от традиционных корпоративных ЦОДов, а в некоторых случаях – возврат к услугам открытых хранилищ международных гигантов с учетом требований законодательства конкретных стран. Облачные решения общего доступа будут расти еще большими темпами, в то время как доля собственных ЦОДов предприятий будет сокращаться.

Иногда считают, что пользователи особо крупных ЦОДов предпочитают только одномодовое оптическое

волокно (OM 3). Однако, к примеру, компании Google, Alibaba и Baidu имеют сети, развернутые на MM OM, и планируют его дальнейшее применение в своих "дорожных картах". На рынке виден растущий интерес крупнейших компаний США к MM-решениям на основе стандартов 400G-SR4.2 (рассматривается далее) и 400G-SR8 для широкого круга приложений, в том числе для организации сетевых шлюзов.

Почему же многомодовое OM остается более предпочтительным, чем одномодовое, несмотря на преимущества последнего в линиях связи большой протяженности? Такому выбору способствуют малые размеры, конструктивные особенности и стоимость решений.

### ЧЕМ ПРИВЛЕКАТЕЛЬНО МНОГОМОДОВОЕ OM?

Примерно до 2010 года основной средой передачи данных в ЦОДах были медные кабели. Однако, по мере того, как скорости обмена данными возрастали, расстояния передачи по кабелям "витая пара" категорий 5e/6 значительно сокращались и в отдельных случаях ограничивались 5-7 м. Для соединений 40 Гбит/с нередко используются 8-парные кабели. Однако диаметр такого кабеля в 3-4 раза больше диаметра соответствующего оптического кабеля (OK).

Прокладка большого количества медных кабелей препятствует свободной циркуляции воздуха вокруг стойки с оборудованием, что существенно затрудняет его охлаждение. Диаметр OK существенно меньше, это обеспечивает экономию пространства и облегчает их развертывание.

Сравнивая различные типы OM, заключаем, что MM OM продолжает оставаться экономически более эффективным решением по сравнению с OM OM для относительно коротких расстояний передачи. Хотя цена MM OM и выше, однако более низкая стоимость приобретения и обслуживания активного оптического оборудования перекрывает разницу в стоимости кабеля [1].

Одномодовые приемопередатчики (трансиверы) продолжают стоить дороже многомодовых, в зависимости от скорости передачи, в 1,5-5 раз. С развитием высокоскоростных оптоэлектронных технологий и увеличением объемов производства сокращается как абсолютная цена, так и разница между стоимостью оборудования двух видов. Тем не менее цена одномодового активного оборудования традиционно остается более высокой по сравнению с многомодовым оборудованием с аналогичными характеристиками [2].

К тому же MM-приемопередатчики потребляют меньшую мощность электропитания по сравнению с одномодовыми, что является важным фактором при оценке затрат.

Применение MM OM в ЦОДах с их тысячами соединений позволяет сократить затраты и на активное оборудование, и на электроэнергию и охлаждение. Простота монтажа коннекторов является еще одним существенным фактором для крупных компаний, где имеют место частые изменения в топологии сети. Важно и то, что многомодовые оптические коннекторы менее требовательны к чистоте торцов. При наличии даже незначительных их загрязнений уровень сигнала у одномодовых коннекторов может существенно снизиться, в то время как для многомодовых аналогов потери мощности в таких случаях обычно намного меньше.

### Эволюция многомодового волокна

В табл.1 представлены пять типов MM OM, присутствующих на современном мировом рынке.

Согласно последним редакциям стандартов ISO/IEC 11801 и TIA 568 типы волокна OM1 (Ø62,5 мкм) и OM2 (Ø50 мкм) признаны устаревшими и более не упоминаются в основном тексте этих документов. Их, однако, допускается применять для расширения существующих сетей старой постройки. Новые системы должны строиться на MM OM типов OM3, OM4 или OM5.

OM типа OM3 было разработано еще в 2003 году. Оно стало первым, рассчитанным для работы с лазерными источниками 850 нм, и было предназначено главным образом для работы в сетях со скоростями 1 и 10 Гбит/с. OM типа OM4 появилось в 2009 году и предназначено для линий длиной до 400 м при скорости 10 Гбит/с (в некоторых случаях длина может достигать 550 м).

Самой недавней разработкой (2017 г.) стало "широкополосное" волокно OM5. Традиционно MM OM было предназначено для работы на какой-то одной длине волны (850, 1300 нм и т.д.). По мере увеличения требований к скоростям передачи разрабатывались и лазеры с соответствующим быстродействием. Эта ситуация сохранялась до скорости 10 Гбит/с и позднее – до 25 Гбит/с. Но для дальнейшего увеличения скорости была введена параллельная передача по нескольким OM: сначала 40 Гбит/с, а затем – 100 Гбит/с. Для этого использовалась передача по четырем OM одновременно.

Волокно типа OM5 стало первым MM OM для работы одновременно на многих длинах волн. Оно обеспечивает дуплексную передачу 100 Гбит/с на двух или четырех длинах волн в интервале 850-950 нм. При этом можно воспользоваться преимуществом при передаче по многомодовому волокну на более длинных волнах. За счет меньшей величины хроматической дисперсии на более длинных волнах смягчаются требования к модовому коэффициенту широкополосности.

Таблица 1. Типы многомодовых волокон

Типоразмер ММ ОВ	(термины взяты из стандартов ISO/IEC 11801)						Пропускная способность, МГц·км						
	ISO/IEC 11801-1, ноябрь 2017 г.	IEC 60793- 2-10, август 2017 г.	TIA- 568.3-D, октябрь 2016 г.	TIA/EIA 492AAAx	МСЭ-Т, декабрь 2008 г.	Максимальный коэффициент затухания в кабеле, дБ/км	850 нм	1300 нм	Минимальная ширина полосы пропускания (OFL)	850 нм	1300 нм	850 нм	953 нм
62,5/125	OM1 <sup>(1)</sup>	A1b	TIA- 492AAAA- (OM1)	492AAAA	–	3,5	1,5	200	500	–	–	–	–
50/125	OM2 <sup>(2)</sup>	A1a.1b <sup>(3)</sup>	TIA- 492AAAB- (OM2)	492AAAB	G.651.1	3,5	1,5	500	500	–	–	–	–
50/125	OM3	A1a.2b <sup>(3)</sup>	TIA 492AAAC (OM3)	492AAAC	–	3,0 <sup>(4)</sup>	1,5	1500	500	2000	–	–	–
50/125	OM4	A1a.3b <sup>(3)</sup>	TIA 492AAAD (OM4)	492AAAD	–	3,0 <sup>(4)</sup>	1,5	3500	500	4700	–	–	–
50/125	OM5	A1a.4b <sup>(3)</sup>	TIA 492AAAE (OM5)	492AAAE	–	3,0	1,5	3500	500	4700	2470	–	–

(1) ОВ типа OM1 обычно имеет Ø62,5 мкм (в некоторых случаях – 50 мкм).

(2) ОВ типа OM2 обычно имеет Ø50 мкм (в некоторых случаях – 62,5 мкм).

(3) Буква b обозначает малые потери на изгибах.

(4) Согласно ISO/IEC 11801 максимальный коэффициент затухания в кабеле – 3,5 дБ/км.

Серийно выпускаемые приемопередатчики поддерживают все перечисленные технологии. Фактически, основной вклад в разработку стандарта широкополосных многомодовых волоконно-оптических линий связи был внесен несколькими крупными производителями приемопередающего оборудования. В частности, ими разработаны указания по выбору межканальных интервалов длин волн для спектрального уплотнения WDM. В результате этого рабочее окно длины волны переместилось с 850 на 953 нм.

Дополнительным требованием была поддержка всех существующих приложений и дальности передачи систем, основанных на OM4. Иными словами, волокно типа OM5 обеспечивает полную обратную совместимость с требованиями к OM4, включая области применения и ограничения по расстоянию.

В табл.2 показаны те характеристики, где спецификации OM5 были усилены, чтобы обеспечить поддержку WDM. Отметим, что на длине волны 850 мкм

так называемая "лазерная полоса пропускания" (также именуемая эффективным модовым коэффициентом широкополосности – EMB) осталась неизменной и равна 4700 МГц·км. Дальность передачи на длине 850 нм соответствует типу OM4. Дополнительные требования появились на 953 нм, "дальнем конце" диапазона длин волн, где EMB должен быть не менее 2470 МГц·км. Интервал длин между 850 и 953 нм предназначен для многомодовых WDM-приложений.

Стандарты, касающиеся многомодового ОВ и оптических кабелей типа OM5, сегодня уже можно считать устоявшимися. Стандарт на волокно TIA-492AAAE был опубликован в июне 2016 года; стандарт IEC 60793-2-10 был принят Международной электротехнической комиссией (МЭК) в августе 2017 года. Стандарт структурированных кабельных систем ANSI/TIA-568.3-D принят TIA в октябре 2016 года, а стандарт ISO/IEC 11801-1 был опубликован в октябре 2017 года. Стандарт 11801 определяет обозначение

Таблица 2. Сравнение характеристик многомодовых волокон типов OM4 и OM5

Характеристики	OM4	OM5
Длина волны нулевой дисперсии	$1\,295 \leq \lambda_0 \leq 1\,340$ нм	$1\,297 \leq \lambda_0 \leq 1\,328$ нм
Наклон в точке нулевой дисперсии	$S_0 \leq 0,105$ пс/нм <sup>2</sup> ·км для $1\,295 \leq \lambda_0 \leq 1\,310$ нм и $\leq 0,000375(1590-\lambda_0)$ пс/нм <sup>2</sup> ·км для $1\,310 \leq \lambda_0 \leq 1\,340$ нм	$S_0 \leq 4(-103)/$ $(840(1-(\lambda_0/840)^4))$ пс/нм <sup>2</sup> ·км
850 нм EMB	4 700 МГц·км	4 700 МГц·км
953 нм EMB	Не применимо	2 470 МГц·км

EMB – эффективный модовый коэффициент широкополосности.

OM5 как относящееся к широкополосному многомодовому волокну. Это обозначение также будет включено, со ссылкой на I1801, и в соответствующие будущие стандарты TIA и МЭК, касающиеся оптоволокон.

#### ТЕНДЕНЦИИ В РАЗРАБОТКАХ ОБОРУДОВАНИЯ

Какое же оборудование может быть использовано для работы с волокном OM5? В табл.3 представлены дальности передачи доступных сегодня приемопередатчиков с "коротковолновым" спектральным уплотнением (SWDM). Очевидно, что тогда как OM3 и OM4 поддерживают короткие расстояния, стандарт OM5 гарантирует увеличенную дальность для целого ряда приложений.

Первым широко применяемым активным оборудованием для OM5 стали двунаправленные (BiDi) трансиверы 40 Гбит/с. Дуплексные линии 40 Гбит/с (BiDi и SWDM4) сегодня широко применяются,

а так как системы 100 Гбит/с становятся все более распространенными, аналогичных тенденций можно ожидать и здесь. Внедрение стандарта eSWDM4 (SWDM повышенной протяженности) еще более расширит рынок для MM OB, поддерживающего дуплексную связь со скоростью 100 Гбит/с на расстояниях до 400 м.

Для координации этих разработок в 2015 году был учрежден SWDM Alliance. В состав организации входят компания OFS и ряд других поставщиков оптических волокон и кабелей, трансиверов и коммутаторов. Организация ставит перед собой задачу продвижения технологии SWDM в линиях связи малой протяженности. Альянс разработал соглашение о совместимости оборудования (MSA, multi-source agreement), используемого в SWDM-системах. Разработаны спецификации для трансиверов 40 и 100 Гбит/с, с которыми можно ознакомиться на сайте swdm.org.

Таблица 3. Дальность работы SWDM-приемопередатчиков с LC Duplex

Скорость, Гбит/с	Приемопередатчик	Форм-фактор	$\lambda$	Дальность передачи, м		
				OM3	OM4	OM5
40	BiDi	QSFP+	2	100	150	200
40	SWDM4	QSFP+	4	240	350	440
100	BiDi	QSFP28	2	70	100	150
100	SWDM4	QSFP28	4	75	100	150
100	eSWDM4	QSFP28	4	200	300	400

Недавно было анонсировано MSA 400 Гбит/с BiDi, которое призвано способствовать реализации всех преимуществ мультиспектральной передачи по четырем парам волокон. Целью этого соглашения, в частности, является разработка спецификаций, необходимых для организации линий протяженностью до 150 м по волокну OM5.

Следует отметить, что данные решения выходят за рамки существующих стандартов. Они основаны на рекомендациях по соглашению MSA либо на уникальных разработках поставщиков коммутаторов и/или трансиверов. Тем не менее трансиверы оборудованы стандартными переходниками (QSFP+ или QSFP28) малого форм-фактора, что вполне решает проблему совместимости.

Данные решения обратно совместимы с волокнами OM3 и OM4 (для коротких расстояний), однако в случае OM5 получается значительный выигрыш по дальности по сравнению с OB более "старых" типов.

## НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ В ТЕХНОЛОГИЯХ ПЕРЕДАЧИ СИГНАЛОВ ПО MM OB

Одним из известных технических приемов является четырехуровневая амплитудно-импульсная модуляция (PAM-4 – four-level pulse amplitude modulation) – более сложный вид модуляции в сравнении с простой бинарной амплитудной манипуляцией. В случае PAM-4 можно передавать удвоенное количество информации за один период времени за счет использования четырех уровней сигнала. PAM-4 будет включена в новые редакции известных стандартов Ethernet и Fiber Channel, а также в соглашения MSA и в рекомендации для производителей оборудования по повышению скорости передачи данных. Такая технология обеспечивает передачу 50 Гбит/с с современными лазерами 25 Гбод/с, но с увеличением быстродействия лазеров будет возможно дальнейшее увеличение скорости передачи.

Конечно, усложнение приводит к удорожанию. В случае PAM-4 для уверенного распознавания четырех уровней требуется более сложный приемник, чем при передаче с амплитудной манипуляцией. Требования к сложности приемника могут быть снижены путем использования технологий по борьбе с искажениями сигнала (например, применение эквалайзеров и/или прямой коррекции ошибок).

## НОВЕЙШИЕ СТАНДАРТЫ ETHERNET

Первые стандарты для 40- и 100-гигабитного Ethernet – 40GBASE-SR4 и 100GBASE-SR10 – были приняты в 2010 году. В обоих вариантах используются параллельная передача по нескольким OB для обеспечения более высокой скорости на коротких (SR – short

reach) линиях. Цифры 4 или 10 после SR обозначают количество пар OB. По каждой паре осуществляется двунаправленная передача данных со скоростью 10 Гбит/с. Соответственно, для 40 Гбит/с необходимо 4 пары OB, а для 100 Гбит/с – 10. Обычно в качестве физического интерфейса для 40 Гбит/с применяются 12-волоконные MPO-разъемы, а для 100 Гбит/с – один 24-волоконный или два 12-волоконных MPO-разъема.

40GBASE-SR4 получил широкое распространение. Первоначально к одному порту 40 Гбит/с данного коммутатора подключались до четырех серверов с нагрузкой до 10 Гбит/с каждый, позднее появились межкоммутаторные линии 40 Гбит/с. Также доступны модули 40GBASE-eSR4, предназначенные для более дальних расстояний. Некоторые ЦОДы используют нестандартное оборудование, выпускаемое рядом производителей и способное работать на больших расстояниях, чем определено в действующих стандартах.

Трансиверы 100GBASE-SR10 не получили столь широкого применения в основном из-за того, что появившиеся новые стандарты требуют задействования меньшего количества пар OB.

Оба типа модулей, упомянутые выше, поддерживают расстояние до 150 м по волокну OM4, причем доступны и модули 40 Гбит/с большей дальности.

Вскоре после появления стандарта 100GBASE-SR4 стало очевидным, что он может применяться в качестве основы для дальнейшего развития, подобно ситуации при ранних инсталляциях 40 Гбит/с, и в 2016 году был опубликован стандарт на модули 25GBASE-SR по одной паре волокон. При этом четыре сервера 25 Гбит/с поддерживаются одним портом коммутатора 100GBASE-SR4.

В 2017 году были предложены решения Ethernet на 200 и 400 Гбит/с. Был добавлен еще один тип многомодового трансивера. Стандарт 400GBASE-SR16 использует 16 пар волокон, по каждой паре передается 25 Гбит/с. Востребованность подобных модулей пока под вопросом, поскольку не все заказчики готовы прокладывать 32-волоконные ОК для организации одной линии связи. Более новые стандарты Ethernet предполагают использование меньшего числа OB за счет применения формата кодирования PAM-4 и технологии WDM.

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ ETHERNET

В табл.4 представлены стандарты Ethernet для многомодовых ВОЛС, основанные на технологии IEEE 802.3cd.

Все стандартизированные решения для многомодовых сетей построены на применении трансиверов

Таблица 4. Стандарты для Ethernet 50/100/200 Гбит/с (IEEE 802.3cd)

Оптический приемопередатчик (PMD)	Протяженность линии	Количество задействуемых волокон, их тип	Технология
50GBASE-SR	100 м – OM4/OM5	2, многомод	1x50G PAM-4 850 нм
50GBASE-FR	2 км	2, одномод	1x50G PAM-4 1300 нм
50GBASE-LR	10 км	2, многомод	1x50G PAM-4 1300 нм
100GBASE-SR2	100 км	4, одномод	2x50G PAM-4 850 нм
100GBASE-DR	500 км	2, одномод	1x100G PAM-4 1300 нм
200GBASE-SR4	100 км	8, многомод	4x50G паралл. PAM-4 850 нм

50GBASE-SR, обеспечивающих передачу данных со скоростью 50 Гбит/с с использованием формата PAM-4 дальностью до 100 м по ОВ обоих типов: OM4 и OM5. Поскольку рабочая длина волны для модулей по протоколу 802.3cd составляет строго 850 нм, применение волокна OM5, поддерживающего многоволновую передачу данных, экономически нецелесообразно. Решение 100GBASE-SR2 основано на задействовании двух пар ОВ, а 200GBASE-SR4 – четырех пар для обеспечения скорости передачи данных 200 Гбит/с.

Институт инженеров электротехники и электроники (IEEE) принял решение о формировании новой рабочей группы для разработки технологического решения IEEE 802.3cm. Группа получила мандат на разработку двух новых стандартов для передачи данных по многомодовым ВОЛС со скоростью 400 Гбит/с. Трансиверы 400GBASE-SR8 будут использовать восемь пар ОВ, каждая из которых поддерживает скорость 50 Гбит/с. Необходимость в разработке такой технологии возникла после получения от одного из производителей гигантского ЦОДа задания на создание гибкого решения, обеспечивающего, кроме прочего, разграничение линий связи со скоростью передачи 50, 100 и 200 Гбит/с, а также применение прямых межкоммутаторных линий со скоростью 400 Гбит/с. Трансиверы 400GBASE-SR8 будут поддерживать два различных сетевых интерфейса: 16-волоконный MPO нового типа, одобренный ассоциацией TIA, и 24-волоконный MPO традиционного типа с двумя рядами, по 12 оптических волокон в каждом.

Также предлагается второй тип трансиверов – 400GBASE4.2. Этот стандарт станет первым в своем роде технологическим решением, позволяющим реализовать весь потенциал широкополосных волоконно-оптических линий типа OM5.

Рабочая группа ставит перед собой следующие ключевые цели: работа на второй длине волны (910 нм) и обеспечение двусторонней передачи данных (BiDi). В рамках стандарта 400GBASE-SR4.2 предполагается внедрить новую систему назначения имен для наглядной идентификации каналов, используемых в оптических приемопередатчиках: SRx.y, где x обозначает число ОВ, а y – число длин волн.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Требования к пропускной способности постоянно растут, и, соответственно, увеличивается скорость передачи данных, обеспечиваемая сетевым оборудованием. Неуклонный рост применения многомодовых ВОЛС в архитектуре корпоративных облачных серверов, гибридных и особо крупных ЦОД стимулирует развитие технологий, используемых в многомодовых приемопередатчиках для высокоскоростной связи, необходимой для новейших ЦОД и прочих масштабных требований рынка.

Многомодовые ВОЛС продолжают превосходить другие среды передачи и по суммарной экономичности, и по удобству их эксплуатации. Разработчики волоконно-оптического оборудования в сотрудничестве с органами по стандартизации и рабочими группами, такими как группа по разработке соглашения о совместимости оборудования, используемого в SWDM-системах, продолжают работу над новыми технологическими решениями для удовлетворения стремительно растущих потребностей рынка.

### ЛИТЕРАТУРА

1. In Support of 200G MMF Ethernet PMDs. – NGMMF Study Group, January 2018.
2. Relative Link Costs for 100G Applications. – NGMMF Study Group, January 2018.