

Техническая эффективность параллельных многомодовых оптических кабельных трактов категории OM5 для ЦОД

А.Б. Семенов, д.т.н., профессор,
Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет, (НИУ МГСУ), г. Москва,
М.С. Былина, к.т.н., доцент,
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, (СПбГУТ), г. Санкт-Петербург

Показана целесообразность перехода на схему спектрального мультиплексирования при построении телекоммуникационной инфраструктуры современных центров обработки данных. Обоснована расчетная модель для определения предельной длины тракта с учетом зависимостей коэффициента затухания и широкополосности от длины волны. Выполнена оценка технического выигрыша при использовании новых многомодовых оптических волокон категории OM5.

Оптическое волокно, центр обработки данных (ЦОД), длина тракта передачи, многомодовое оптическое волокно, категория OM5.

Technical efficiency of parallel multimode optical cable channels category OM5 for data centers

A.B. Semenov, Ph.D., Professor,
Moscow State National Research University of Civil Engineering, Moscow,
M.S. Bylina, Ph. D., associate Professor,
The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg

The expediency of transition to the principle of wavelength multiplexing scheme in the process of building the telecommunications infrastructure of modern data centers. Grounded computational model to determine the maximum length of the optical channel, which takes into account the dependence of attenuation- and bandwidth factors on the wavelength. Evaluated technical benefit to using a new generation wideband multimode optical fiber of category OM5.

Optical fiber, data center, the length of optical channel, multimode optical fiber, category OM5.

Современные информационно-телекоммуникационные системы в большинстве случаев реализуются по централизованной схеме на основе центра обработки данных (ЦОД) [1-3, 10]. Для обеспечения приемлемого времени отклика на поступающие запросы в ЦОД требуются быстродействующие проводные каналы связи.

Тракты передачи информации аппаратного зала ЦОД реализуются обычно на многомодовой (ММ) волоконной оптике. Поскольку широкополосность ММ оптического волокна (ОВ) ограничена, для реализации высокоскоростных трактов (40-100 Гбит/с) отдельно или в комплексе применяются [1, 7, 10]:

1) Схема пространственной параллельной передачи. Сигнал со скоростью V разделяется на n потоков (субканалов), каждый из которых имеет скорость V/n . Полученные потоки одновременно передаются по отдельным оптическим волокнам (ОВ). Многоволоконный кабель, ОВ которого используются для реализации схемы параллельной передачи, называют транковым кабелем.

2) Разреженное спектральное мультиплексирование в области коротких длин волн SWDM (Shortwave Wavelength Division Multiplexing). Сигнал со скоростью V разделяется на 4 потока (субканала), каждый из которых имеет скорость $V/4$ и преобразуется в оптический сигнал со своей длиной волны (850, 880, 910 или 940 нм). Полученные потоки объединяются в групповой сигнал с помощью оптического мультиплексора и одновременно передаются по одному ОВ.

В начале 2017 года была стандартизирована новая категория OM5 ММ ОВ, предназначенных для создания высокоскоростных трактов с использованием схемы SWDM. В

известных источниках отсутствует технико-экономический анализ такого решения, что не позволяет в полной мере оценить его эффективность. Далее рассмотрен вариант устранения данного пробела.

Небольшой срок, прошедший с момента официальной стандартизации технологии SWDM и ОВ категории OM5, не позволяет выполнить полноценный технико-экономический анализ. Поэтому в дальнейшем ограничимся оценкой только технической эффективности рассматриваемого решения, приняв в качестве ее численной меры величину

$$M = VL_0\xi, \quad (1)$$

где V – информационная скорость в тракте передачи в Гбит/с (суммарная по всем организуемым потокам); L_0 – максимальная протяженность тракта, м; $\xi = k / N$ – коэффициент использования транкового кабеля (k – число ОВ, используемых для параллельной передачи, N – общее число ОВ в кабеле).

Из (1) видно, что для расчета M необходимо оценить максимальную протяженность тракта L_0 (дальность связи).

Расчетная модель, используемые приближения и упрощения

Будем считать, что передача производится по простому кабельному тракту, который согласно [8] состоит из стационарной линии и двух оконечных аппаратных шнуров.

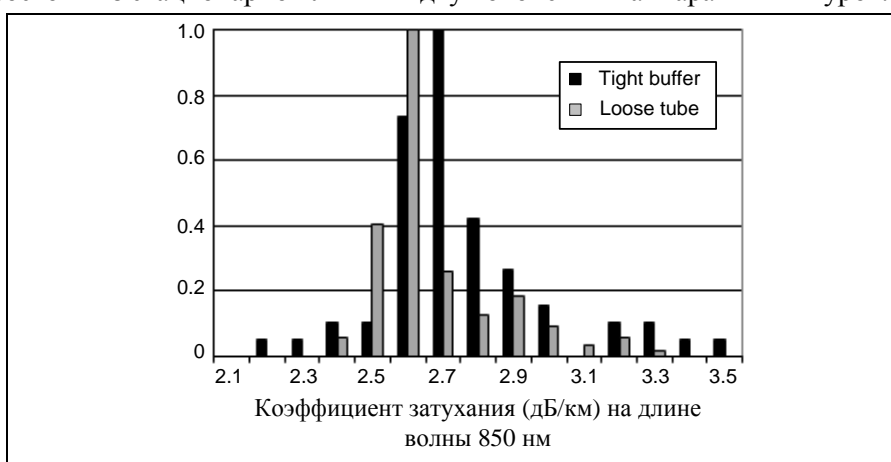


Рисунок 1 – Гистограмма коэффициента затухания ММ волоконно-оптических кабелей СКС

Обеспечение заданного качества информационного обмена в случае использования параллельной передачи требует выполнения норм по затуханию, дисперсионным искажениям и оптическому skew, под которым понимают разность между максимальным и минимальным временами задержки сигналов, при использовании параллельной схемы передаваемых по различным ОВ. Каждый из перечисленных факторов может ограничивать максимальную протяженность тракта СКС.

Характеристики линейных и шнуровых кабелей СКС в части перечисленных параметров эквивалентны. Это позволяет оперировать общей протяженностью тракта без учета ее распределения по отдельным составляющим.

В нормативных документах IEEE и ISO/IEC, регламентирующих максимальную протяженность L_0 трактов СКС, предполагается, что типичное значение коэффициента затухания ММ ОВ составляет $\alpha = 3.0$ дБ/км на длине волны $\lambda = 850$ нм, а среднее затухание ММ разъемного соединителя (РС) $A_c = 0.5$ дБ. Современные ММ ОВ и РС имеют меньшие потери. Из рис. 1 видно, что согласно накопленной статистике коэффициент затухания ММ ОВ составляет примерно 2.5 дБ/км. Ведущие производители РС в спецификациях на свою продукцию указывают среднее затухание в пределах 0.2 - 0.3 дБ. РС со сниженными потерями маркируются «Elite», «low loss» и т.п.

Улучшенные параметры серийно выпускаемых ОВ и РС позволяют увеличить протяженность тракта по сравнению с протяженностью, установленной стандартами (спецификационной). При дальнейшем анализе они не принимаются во внимание и рассматриваются как запас расчета.

Дисперсионные искажения в ОВ принято оценивать коэффициентом широкополосности ΔF [4, 6, 9, 11], который зависит от длины волны λ и связан с дисперсией D известным соотношением $D(\lambda) = k / \Delta F(\lambda)$, где k – коэффициент, зависящий от формы сигнала и равный,

например, 0.34 для прямоугольного импульса и 0.14 для импульса гауссовой формы.

Многомодовые параллельные кабельные тракты имеют протяженность не выше нескольких сотен метров. Это позволяет считать, что ширина полосы пропускания ОВ f_0 обратно пропорциональна протяженности тракта $f_0 = \Delta F / L$ [6].

Известно, что дисперсия в ММ ОВ складывается из двух составляющих – хроматической D_λ (ХД) и межмодовой $D_{\text{ММ}}$ (МД) [4, 6, 9, 11]. ОВ категории OM5 не используют механизм вычитания ХД из МД, который задействуется в некоторых типах ОВ с целью улучшения их частотных свойств [9]. Однако искажения сигналов в этих ОВ, обусловленные ХД, можно считать незначительными, так как: 1) Величина D_λ в спектральном окне 850 нм существенно меньше $D_{\text{ММ}}$ (для лазерных передатчиков отношение $D_\lambda/D_{\text{ММ}}$ не превышает 0.1 [10]); 2) Ширина линии излучения VCSEL-лазеров системы SWDM уменьшена с обычных 0.6 до 0.5 нм. Данная особенность позволяет отказаться от отдельного учета D_λ .

В общем случае в ММ ОВ могут существовать два типа направляемых лучей – меридиональные, траектория которых пересекает оптическую ось ОВ, и косые. В [12] показано, что для оценки дисперсии достаточно рассматривать только меридиональные лучи, поэтому далее влиянием косых лучей пренебрегаем.

Современные сетевые интерфейсы скоростного диапазона 40-100 Гбит/с согласно требованиям IEEE сохраняют свою работоспособность при величине оптического skew не свыше 79 нс/100 м. Фактически на практике в серийных транковых кабелях на основе волоконных лент или их аналогах обеспечивается значение 7.5-10 нс/100 м. Это позволяет отказаться от отдельного учета ограничения по skew.

Таким образом, для оценки максимальной протяженности тракта СКС будем учитывать только ограничения, накладываемые коэффициентом широкополосности и затуханием в ОВ.

Спектральная характеристика коэффициента широкополосности ММ ОВ

ММ ОВ кабелей СКС имеют усеченный степенной профиль показателя преломления (ППП), который описывается выражением [12]:

$$n(r) = \begin{cases} n_{10} \cdot \sqrt{1 - 2\Delta \cdot (r/r_c)^q}, & 0 \leq r \leq r_c \\ n_2, & r_c < r \leq r_{cl} \end{cases}, \quad (2)$$

где n_{10} , n_2 – показатели преломления (ПП) сердцевин на оптической оси и оболочки ОВ, зависящие от длины волны, r_c , r_{cl} – радиусы сердцевин и оболочки ОВ, q – показатель степенного ППП, r – расстояние от оптической оси ОВ, $\Delta = (n_{10}^2 - n_2^2) / 2n_{10}^2$ – высота ППП.

Лучи меридиональных мод в таких волокнах распространяются по синусоидальным траекториям и исчерпывающе характеризуются скалярным лучевым инвариантом $B = n(r) \cdot \cos \theta_z(r)$, определяющим направление луча в точке, находящейся на расстоянии r от оси. $\theta_z(r)$ – угол между касательной к траектории луча и осью ОВ.

В [12] предлагается характеризовать луч удельным временем прохождения τ (временем распространения луча на расстояние 1 км вдоль оптической оси ОВ) и определять дисперсию D как разность между минимальным τ_{min} и максимальным τ_{max} удельными временами прохождения лучей, соответствующих направляемым модам:

$$D = \tau_{\text{max}} - \tau_{\text{min}}. \quad (3)$$

В [12] показано, что τ луча в ОВ с усеченным степенным ППП зависит только от его инварианта и определяется выражением:

$$\tau(B) = \frac{1}{c} \cdot \frac{n_{10g}}{q+2} \left[(p+q) \cdot \frac{n_{10}}{B} + (2-p) \cdot \frac{B}{n_{10}} \right], \quad (4)$$

где n_{10g} – групповой ПП сердцевин ОВ на оптической оси, p – параметр внеосевой дисперсии материала сердцевин ОВ. Параметры n_{10g} и p зависят от длины волны λ и определяются как:

$$n_{10g} = n_{10} - \lambda \cdot \frac{dn_{10}}{d\lambda}, \quad p = \frac{n_{10}}{n_{10g}} \cdot \frac{\lambda}{\Delta} \cdot \frac{d\Delta}{d\lambda}. \quad (5)$$

Удельное время прохождения представляет собой функцию инварианта, имеющую минимум при $B = B_m$ (рис. 2)

$$B_m = n_{10} \cdot \sqrt{(q+p)/(2-p)}. \quad (6)$$

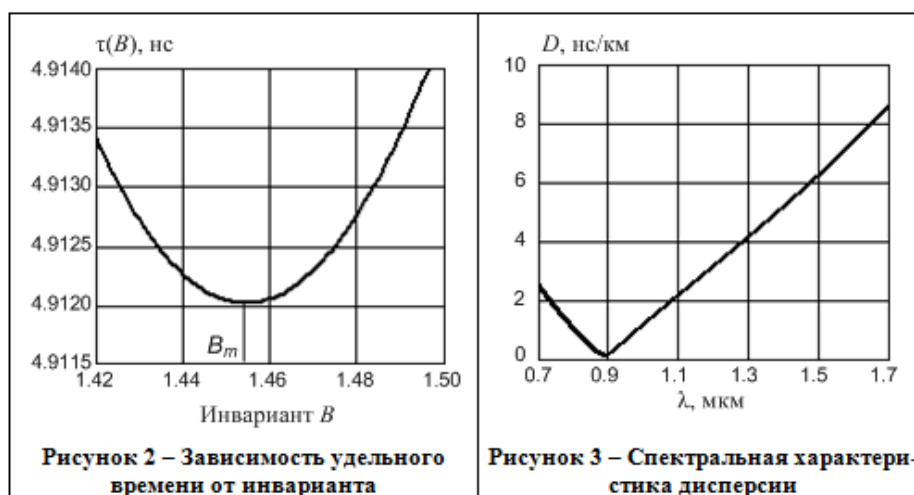
Учитывая, что направляемым модам соответствуют только лучи, для которых $n_2 < B \leq n_{10}$, для τ_{\max} и τ_{\min} , получаем:

$$\tau_{\max} = \max[\tau(n_{10}), \tau(n_2)],$$

$$\tau_{\min} = \begin{cases} \min[\tau(n_{10}), \tau(n_2), \tau(B_m)], & n_2 < B_m < n_{10} \\ \min[\tau(n_{10}), \tau(n_2)], & B_m < n_2 \text{ и } B_m > n_{10} \end{cases}. \quad (7)$$

где max и min обозначают выбор наибольшего или наименьшего из перечисленных значений.

На рисунках 2 и 3 представлены результаты расчетов по (3)-(7) для ММ ОВ с усеченным степенным ППП, имеющим чисто кварцевую оболочку и сердцевину, легированную оксидом германия GeO_2 с концентрацией на оптической оси 13.5 молярных процентов. Показатель степенного профиля q принимался равным 2.



Из рисунка 3 видно, что спектральная характеристика дисперсии достигает явно выраженного минимума на определенной длине λ_0 волны. Конкретное значение λ_0 и обеспечиваемого на ней ΔF меняется в достаточно широких пределах в зависимости от концентрации легирующих добавок в сердцевине волокна. Последнее означает: 1) относительную простоту перехода к категории OM5, требуемые спектральные параметры которых обеспечиваются изменениями концентрации легирующих добавок; 2) потенциальную возможность использования кабельных трактов категории OM3 и OM4 для поддержки функционирования сетевых интерфейсов SWDM.

Частотные свойства волокна в рабочей полосе SWDM

ОВ категорий OM3-OM5 изготавливаются по одинаковой технологии, имея только различную концентрацию легирующих добавок в сердцевине. Это позволяет в дальнейшем считать их эквивалентными в части α и ΔF на оптимальной длине λ_0 волны.

Из рисунка 3 видно, что спектральная характеристика дисперсии в довольно широкой окрестности λ_0 демонстрирует высокую линейность. Типовая крутизна составляет порядка 10 нс/мкм при $\lambda < \lambda_0$ и 8 нс/мкм при $\lambda > \lambda_0$.

Для обеспечения обратной совместимости ОВ категории OM5 с «одноволновыми» световодами категории OM4, изделия OM5 должны иметь $\Delta F = 4700$ МГц·км при $\lambda = 850$ нм. Совместимость возможна за счет того, что ведущие производители ОВ обеспечивают в своей продукции категории OM4 существенный запас по широкополосности: $\Delta F = 6$ ГГц·км при $\lambda = 850$ нм.

Примеры спектральных характеристик ОВ различных категорий приведены на рисунке 4.

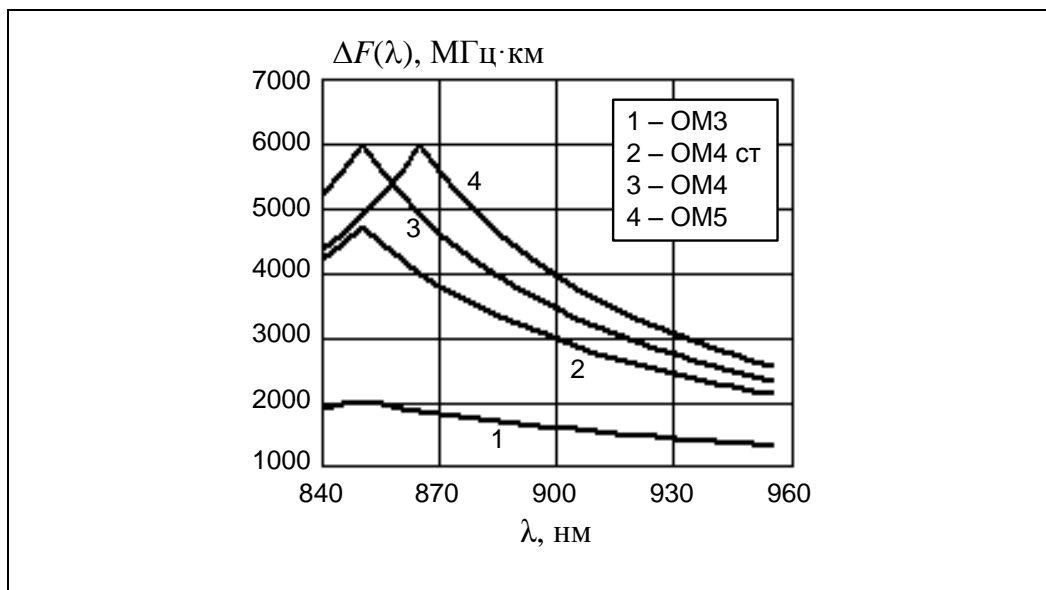


Рисунок 4 – Расчетная спектральная характеристика коэффициента широкополосности градиентных ММ ОВ

Спектральная характеристика коэффициента затухания

Основной вклад в коэффициент затухания ОВ α вносят фундаментальные рэлеевские и микроизгибные потери. Кабельные потери согласно рисунку 1 достаточно малы и отдельно не учитываются. Рэлеевские потери на основании [5] с учетом уточнений [11] равны (дБ/км):

$$\alpha_p = 0,9 / \lambda^4. \quad (8)$$

Микроизгибная составляющая рассматривается как константа и на основании данных табл. 1 составляет $\alpha_{ми} = 0,78$ дБ/км. В дальнейшем принимается $\alpha = \alpha_p + \alpha_{ми} + X$, где $X = 0,5$ дБ/км – эксплуатационный запас. Такое аналитическое описание дает точность оценки $\alpha(\lambda)$, достаточную для корректного выполнения инженерных расчетов.

Предельная дальность связи

Предельная протяженность тракта СКС $L_0(\lambda)$ представляет собой решение уравнения энергетического баланса относительно L [7]:

$$E = A_c + \alpha(\lambda)L + P(L, \lambda) + Z, \quad (9)$$

где E – энергетический потенциал сетевого интерфейса, A_c – суммарные потери в РС, α – коэффициент затухания ОВ, L – протяженность тракта, P – дисперсионный штраф (дополнительные потери, определяемые уменьшением амплитуды импульсного сигнала из-за дисперсионных искажений), Z – дополнительные потери, зависящие от схемы реализации параллельной передачи.

Если технология SWDM не используется, следует считать $Z = 0$. При использовании SWDM параметр Z учитывает наличие в тракте передачи мультиплексора и демultipлексора. В доступной литературе отсутствуют данные о потерях, вносимых мультиплексором и демultipлексором SWDM, поэтому в данной работе эти потери приняты равными средним потерям, вносимым мультиплексором и демultipлексором CWDM, рассматриваемым как ближайший аналог, и для дальнейших расчетов принято $Z = 2,5$ дБ.

Таблица 1 – Некоторые параметры ММ ОВ категории OM5

Длина волны, нм	840	850	900	925	953	1300
ΔF в режиме лазерного возбуждения, МГц·км:						
– спецификационный	3840	4700	2900	2700	2550	–
– расчетный (при $\lambda_0=865$ нм)	4160	4740	3900	3150	2640	–
ΔF в режиме возбуждения с переполнением, МГц·км	–	3500	–	–	1850	500
α по ANSI/TIA-492AAAE и IEC 60793-2-10, дБ/км	2.5	2.5	–	–	1.8	0.8
α расчетный, дБ/км	2.54	2.5	2.1	2.0	1.86	–
ХД, пс/(нм·км)	103	–	–	–	61.7	–
Крутизна спектральной характеристики ХД, пс/(нм ² ·км)	–	–	–	–	–	$9.35 \times 10^{-2} (*)$

* – на длине волны 1328 нм

Дисперсионный штраф в дБ составляет [7]:

$$P = \begin{cases} 2.24 (f_m/f_0) - 0.6 & \text{при } f_0 < 0.27 f_m \\ 0 & \text{при } f_0 > 0.27 f_m \end{cases}, \quad (10)$$

где f_m – тактовая частота линейного сигнала. Для сетевых интерфейсов с канальной скоростью 25 Гбит/с с учетом использования в линии блочного бинарного кода 64B66B имеем $f_m = 25.75$ ГГц, у 10-гигабитной техники 10G Base-SR $f_m = 10.31$ ГГц.

Из (9) с учетом (10) получаем ($E' = E + 0.6 - A_c - Z$):

$$L_0(\lambda) = \frac{E'}{2.24 f_0 / \Delta F(\lambda) + \alpha(\lambda)}. \quad (11)$$

Зависимость предельной дальности связи от номера спектрального канала SWDM, рассчитанная по (11), приведена на рис. 5а. Распределение отдельных составляющих потерь для канала L3, который определяет предельную дальность связи, представлено на рис. 5б.

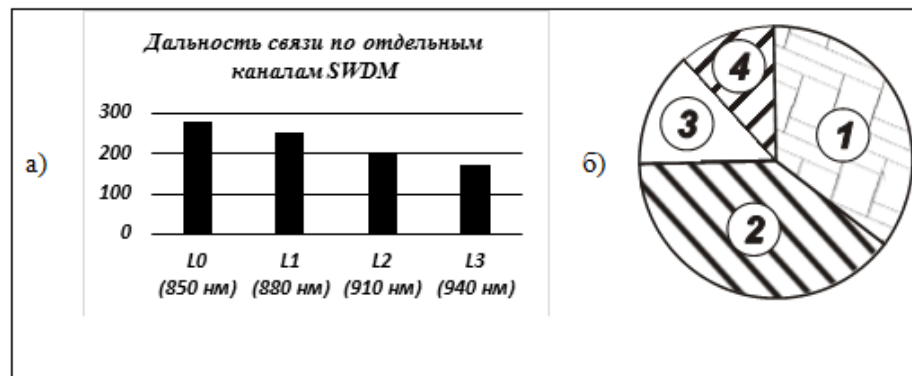


Рисунок 5 – Некоторые характеристики отдельных спектральных каналов системы SWDM: а) предельная расчетная дальность связи по каналам L0-L3, м; б) распределение отдельных составляющих потерь для канала L3 (1 – мультиплексор-демультиплексор; 2 – дисперсионный штраф; 3 – разъемы; 4 – ОВ в кабелях и шнурах)

В окрестности $L = L_0$ на основании (11) имеем

$$\left| \frac{\partial L / \partial \Delta F}{\partial L / \partial \alpha} \right| = \frac{2.24 f_m}{[\Delta F(\lambda)]^2}. \quad (12)$$

Из (12) следует, что для канальной скорости 25 Гбит/с неравенство $\left| (\partial L / \partial \Delta F) / (\partial L / \partial \alpha) \right| > 1$ будет справедливо при $\Delta F < 7.4$ ГГц·км.

Последнее ограничение для спектрального канала L3 при современном уровне техники имеет всеобщее действие и означает необходимость совершенствования в первую очередь частотных свойств ОВ в случае выдвижения со стороны практики требований в части роста предельной дальности связи.

Эффективность вариантов реализации кабельных трактов

Решение уравнения баланса (9) дает возможность определить техническую эффективность

M в соответствии с (1), что отражено в таблице 2. Наряду с оборудованием SWDM в таблице 2 для сравнения представлены величины M «одноканальных» сетевых интерфейсов, в том числе предыдущего поколения.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что:

1) наращивание скорости передачи увеличивает техническую эффективность M , несмотря на одновременное уменьшение L_0 ;

2) технология разреженного спектрального уплотнения имеет преимущество как над обычными дуплексными, так и над параллельными схемами передачи. Достигнутый выигрыш обеспечен в первую очередь более полным использованием возможностей ОВ как среды передачи.

Таблица 2 – Расчетная эффективность ОВ разных категорий для сетевых интерфейсов с различным уровнем быстродействия

Категория ОВ	Скорость передачи, Гбит/с		ξ	Максимальная протяженность тракта L_0 , м			M , (Гбит/с)×км
	Канальная	Общая		Спецификац.	Расчетная	Запас, %	
ОМ3	10	10	1 (ДП)	300	418	46	3.0/4.2
	25	25	1 (ДП)	-	192	-	-/4.8
ОМ4	10	10	1 (ДП)	500	749	45	5.0/7.5
	25	25	1 (ДП)	-	398	-	-/10.0
ОМ3	25	100	0.67 (Base12)	75	79	13	5.0/5.3
	25	100	1 (Base8)	75	79	13	7.5/7.9
ОМ4	25	100	0.67 (Base12)	100	122	22	6.7/8.2
	25	100	1 (Base8)	100	122	22	10.0/12.2
ОМ5	25	100	1 (ДП)	150	173	15	15.0/17.3

Решение уравнения (9) показывает, что в случае спектрального уплотнения по технологии SWDM наиболее существенным фактором, ограничивающим предельную дальность связи, становятся сильные дисперсионные искажения спектрального канала L_3 , верхнего по шкале длин волн. Уменьшение коэффициента затухания лишь частично демпфирует этот процесс.

Отмеченная выше слабая зависимость $L_0(\lambda)$ от α не позволяет существенно нарастить M за счет применения элементной базы с улучшенными параметрами в части вносимого затухания.

Детерминированный характер зависимости $\Delta F(\lambda)$ означает возможность использования СКС, ранее реализованных на основе транковых кабелей с волокнами категории ОМ4, для поддержки техники SWDM. Данная возможность несколько увеличивает техническую эффективность решения в целом, доводя расчетную величину параметра M до 12.2 (Гбит/с)×км.

Передача данных с общей скоростью 100 Гбит/с по параллельной схеме с организацией 4 дуплексных каналов требует 8 волокон транкового кабеля. Поэтому в случае применения схемы Base12 типовой 12-волоконный транковый кабель окажется используемым не полностью (4 волокна не задействуются), т.е. $\xi = 0.67$. Целенаправленный отказ от Base12 в пользу быстро набирающей популярности схемы Base8, у которой $\xi = 1$, частично исправляет ситуацию, но не позволяет технике пространственного уплотнения сравниться с комбинацией ОМ5 + SWDM в части технической эффективности.

Заключение

1. Техническую эффективность ММ линий связи аппаратного зала ЦОД усиливает как наращивание общей скорости передачи, так и переход на более качественную элементную базу.
2. Обращение к технологии разреженного спектрального уплотнения SWDM позволяет более чем на 40% увеличить техническую эффективность ММ трактов передачи, экономически выгодных в аппаратном зале ЦОД.
3. Основным средством улучшения эффективности ММ оптических трактов СКС для ЦОД является совершенствование частотных свойств ОВ транковых и шнуровых кабелей.
4. В случае использования технологии SWDM параметры оптического тракта определяются субканалом с максимальной рабочей длиной волны.
5. Волокна категории ОМ3 по технической эффективности сильно уступают волокнам ОМ4 и, особенно, ОМ5, поэтому они не рекомендуются для применения в новых проектах
6. Системы со спектральным уплотнением намного более критичны к соблюдению ограничения в части превышения максимальной спецификационной протяженности оптического тракта.

Литература

1. Аббасова Т.С. Оптимизация и стандартизация оптической среды взаимодействия вычислительных комплексов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2017. № 1 (112). С. 86-99.
2. Аббасова Т.С., Самаров К.Л. Системный анализ параметров эффективности телекоммуникационного оборудования // Информационно-технологический Вестник. № 2 (08). 2016. С. 49-60.
3. Аббасова Т.С. Современные информационные технологии для анализа помехозащищенности волоконно-оптических коммуникаций // Информационно-технологический Вестник. № 4 (10). 2016. С. 3-17.
4. Бутусов М.М., Верник С.М., Галкин С.Л. и др. Волоконно-оптические системы передачи: учеб. для вузов / под ред. В.М. Гомзина // М.: Радио и связь. 1992. 416 с.
5. Гроднев И.И., Мурадян А.Г., Шарафутдинов Р.М. Волоконно-оптические системы передачи и кабели. Справочник // М.: Радио и связь. 1993. 264 с.
6. Ксенофонтов С.Н., Портнов Э.Л. Направляющие системы электросвязи // М.: Горячая линия. Телеком. 2009. 272 с.
7. Семенов А.Б. Волоконно-оптические подсистемы современных СКС // М.: ДМК-Пресс. 2005. 640 с.
8. Семенов А.Б. Классические структурированные кабельные системы // М.: Горячая линия. Телеком. 2016. 462 с.
9. Семенов А.Б. Многомодовое волокно с улучшенными частотными свойствами // Журнал сетевых решений / LAN. № 2. 2013. С. 48-54.
10. Семенов А.Б. Структурированные кабельные системы для центров обработки данных // М.: Компания Стинс Коман. ДМК Пресс, 2014. 232 с.
11. Скляров О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи. 2-е издание // СПб: Лань. 2010. 267 с.
12. Снайдер А., Лав Дж. Теория оптических волноводов // М.: Радио и связь. 1987. 656 с.