

Эффективность и качество оптических кабелей с многоканальными волокнами

В.Н.Коршунов, д.т.н., главный научный сотрудник ВНИИКП / telecom.cables@vniikp.ru,
И.А.Овчинникова, д.т.н., директор научного направления – зав. отделением ВНИИКП / igrvchinnikova@gmail.com,
Н.А.Шишова, к.т.н., зав. кафедрой МТС МТУСИ / n.a.shishova@mtuci.ru

УДК 621.315, DOI: 10.22184/2070-8963.2024.118.2.30.34

Рассматриваются системные аспекты применения в перспективных телекоммуникационных сетях оптических кабелей с многоканальными волокнами. Оценивается эффективность многоканальных волокон со стандартным и увеличенным диаметром оптической оболочки. Приводятся численные значения пространственной и спектральной эффективности. Сопоставляются эффективность и качество кабеля, выполняется расчет значений факторов обеспечения требуемого качества.

Введение

Эффективность и качество относятся к доминантным свойствам оптических кабелей (ОК), характеризующим соответствие их модифицирования ходу развития информационной инфраструктуры. Неизменный рост трафика требует увеличения пропускной способности инфокоммуникаций. Решению этой задачи может отвечать применение в ОК многоканальных оптических волокон (МКОВ).

Сегодня в нашей стране и в международных организациях стандартизации телекоммуникаций исследуются перспективы динамики электросвязи. В Стратегии развития отрасли связи РФ на период до 2035 года [1] при ежегодном росте трафика на магистральных сетях на 25% предполагается модифицировать до 90% протяженности сетей действующих и построить новые сети с использованием отечественных аппаратуры и кабелей. В концепциях Сеть-2030 МСЭ-Т и Пятое поколение фиксированной сети

F5G ETSI [2] намечен полный перевод сетей на оптические волокна (ОВ) и увеличение пропускной способности более чем в 10 раз. В перспективе к 2030 году ожидается увеличение требуемой пропускной способности системы передачи и сетевого узла наземных линий до, соответственно, 1 Пбит/с и 10 Пбит/с [3].

При условном пределе пропускной способности одномодовых волокон (ООВ) в 100 Тбит/с радикальное ее повышение может быть достигнуто развитием спектрального и пространственного параллелизма передачи сигналов [4]: сверхширокополосностью и увеличением количества пространственных каналов в кабеле и волокне. Исследования показывают на перспективу 2030 года необходимое количество пространственных каналов в оптических системах передачи фиксированных сетей более четырех [5].

ООВ реализует один пространственный канал, МКОВ [6] создают более одного канала посредством

пространственного мультиплексирования: сердцевинного и модового [7]. За счет этого повышается спектральная и пространственная эффективность кабеля.

Эффективность кабеля

Эффективность отражает результат операции создания некоторых свойств объекта с обеспечением требуемого качества. На практике применяются два вида эффективности: сопоставление достигаемого и требуемого результатов [8] и сопоставление достигаемого результата и расходуемого для его осуществления ресурса [9].

Управляемые факторы обеспечения эффективности ОК X составляют множество решений:

$$X = \{x | x = (x_1, x_2, \dots, x_i)\} \quad (1)$$

в виде семейства подмножеств X_k , соответствующих свойствам кабеля. Подмножества X_k могут представлять собой континуумы (непрерывные параметры и характеристики: размеры элементов, коэффициенты затухания и дисперсии, параметры профиля показателя преломления и т.п.) или дискретные множества с конечным количеством элементов (материал, конфигурация и взаимное расположение элементов конструкции ОК, типы профилей показателей преломления, число ОВ, число модулей и т.п.). В частности, подмножество $X_k = X_c$ включает факторы, определяющие пропускную способность C – максимально возможную скорость передачи данных.

Показатель эффективности ОК в виде соотношения достигаемого результата $y(x)$ к требуемому результату y^{TP} определяется как:

$$W(x) = \rho(y(x), y^{TP}) | x \in X, \quad (2)$$

где ρ – функция соответствия.

В зависимости от содержания конкретных задач оценки, обеспечения и повышения эффективности ОК и практических возможностей их решения выбирается вид показателя эффективности в соответствии с концепцией рационального поведения. В рамках концепции пригодности находятся решения, обеспечивающие достижение требуемых свойств ОК. При детерминированных величинах y и y^{TP}

$$W^{np}(x) = \begin{cases} 1 & \text{при } y^3 y^{TP} \\ 0 & \text{при } y < y^{TP} \end{cases} \quad (3)$$

В концепции оптимизации:

$$W(x) = y(x), W^{opt}(x) = \text{extr } y(x), x \in X. \quad (4)$$

Концепция адаптивизации предусматривает изменение стратегии поиска решения X на основе текущей и прогнозной информации. Этой концепции соответствует

итерационный процесс оптимизации по качеству [10], в ходе которого улучшаются отдельные параметры кабеля, причем на отдельных шагах достижение $W^{opt}(x)$ не является обязательным.

Показатель эффективности вида "результат – ресурс" дается в виде отношения численных значений результата выполненной операции $y(x) = G$ и расходуемого ресурса H :

$$W = G/H. \quad (5)$$

Для ОК результат, ресурс и эффективность определяются как:

$$\left. \begin{aligned} G &= \{G_i | i = \overline{1, 2}, G_1 = C, G_2 = M\}, \\ H &= \{H_i | i = \overline{1, 2}, H_1 = F, H_2 = S\}, \\ W &= \{W_i | i = \overline{1, 2}, W_1 = \gamma, W_2 = \xi\}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где M – количество пространственных каналов; F и S – спектральный и пространственный ресурс соответственно (занимаемые под передачу сигналов области частотного спектра и физического пространства); γ и ξ – спектральная и пространственная эффективность соответственно.

Экономическая эффективность использования затрат $\Xi = b/a$ (где b – доход и прибыль; a – затраты в производственном процессе) [11]. Эффективность вида "результат – ресурс" дает численные показатели ОК, а эффективность вида "достигаемый – требуемый результат" аналогична качеству кабеля.

Качество кабеля

Качество ОК показывает способность удовлетворять потребность в его применении. Являясь промышленным продуктом, оптический кабель имеет жизненный цикл в виде круговой последовательности этапов – петли качества [12]. Элементы жизненного цикла ОК:

1. маркетинг;
2. разработка кабеля;
3. подготовка производственных процессов;
4. материально-техническое снабжение;
5. производство;
6. контроль, испытания;
7. хранение;
8. реализация;
9. прокладка и эксплуатация;
10. утилизация после использования.

На этапах жизненного цикла осуществляется управление качеством [13]. Наибольшее внимание в обеспечении качества ОК уделяется производственным процессам,

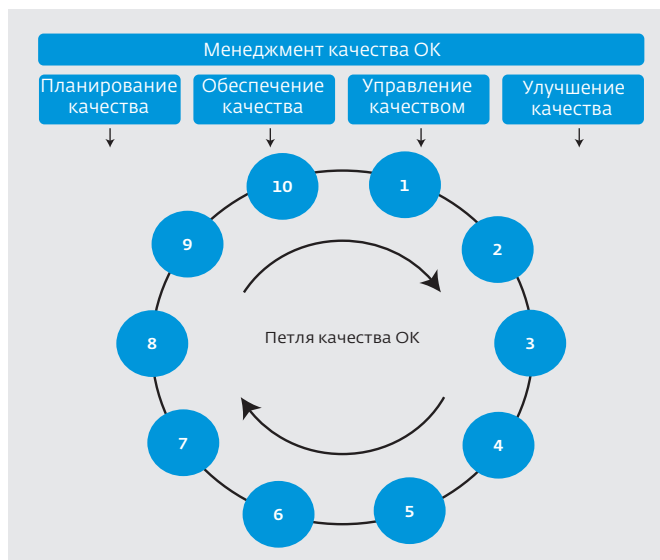


Рис.1. Менеджмент качества и жизненный цикл оптического кабеля

контролю и проведению испытаний (этапы 4–6 петли). Эту область дополняют этапы разработки, подготовки производственных процессов, прокладки и эксплуатации. При современных представлениях об экологии немаловажную роль играет этап утилизации.

Под системой управления качеством продукции понимается комплекс постоянно действующих организационных, технических, экономических и социальных мероприятий, методов и средств, направленных на установление, обеспечение и поддержание необходимого уровня качества продукции на этапах жизненного цикла. Стандарт ГОСТ Р ИСО 9000-2015 [14] регламентирует понятия руководства качеством. Схема менеджмента качества ОК представлена на рис.1. В нем использована приведенная выше нумерация этапов жизненного цикла ОК.

Согласно стандарта, качество – это степень соответствия требованиям присущих (имеющихся) характеристик объекта: продукции, услуги, процесса и т.п. Качество в таком определении аналогично эффективности вида "достижимый – требуемый результат" в концепции пригодности. Менеджмент – скоординированная деятельность по руководству и управлению достижением цели (требуемого результата) применительно к качеству. Части менеджмента качества: планирование (установление целей в области качества, путей и средств достижения), обеспечение (гарантия выполнения требований), управление (выполнение требований), улучшение (повышение способности выполнения требований к качеству). Планирование качества ОК – определение целей приведения их свойств в соответствии с потребностями развивающейся инфраструктуры связи –

является постановкой задачи разработки усовершенствованных модификаций ОК. В частности, применение в кабелях МКОВ способствует достижению цели обеспечения необходимой пропускной способности ОК на перспективу развития инфокоммуникационных сетей.

Многоканальные волокна

К МКОВ относятся оптические волокна, реализующие более одного пространственного канала. Количество пространственных каналов в волокне можно определить по формуле:

$$M = \mu \cdot \psi, \quad (7)$$

где μ – число мод, передаваемых по одной сердцевине;
 ψ – число сердцевин в волокне.

При $M = 1$ волокно является одноканальным (пример – стандартное ООВ), при $M > 1$ – многоканальным. В настоящее время исследуются МКОВ двух классов: с диаметром оптической оболочки $D_{о6} = 125$ мкм и 250 мкм. Первые имеют стандартный размер и удобны в производстве и монтаже. У вторых – увеличенный размер в пределах обеспечения долговременной механической надежности (дальнейшее его увеличение влечет хрупкость ОВ), в них максимизируется количество пространственных каналов.

В реализованном четырехсердцевинном волокне 125 мкм [15] могут передаваться две линейно-поляризованные моды LP_{01} , LP_{11} или три пространственные моды LP_{01} , LP_{11a} , LP_{11b} . В одномодовом и маломодовом режимах могут быть образованы 4, 8 и 12 пространственных каналов. В другом источнике [16] описано 13-сердцевинное волокно 250 мкм, которое обеспечивает передачу пяти мод: LP_{01} , LP_{11} , LP_{21} , LP_{02} , LP_{31} . Количество пространственных каналов доведено до 65.

Можно видеть, что первое МКОВ при равном размере со стандартным ООВ по пропускной способности эквивалентно 12 одномодовым волокнам, а второе при четырехкратном увеличении площади поперечного сечения сопоставимо по этому параметру уже с 65 ООВ. С применением МКОВ представляется возможным многократно увеличить отношение "результат – ресурс" с соответствующим повышением эффективности.

Согласно (5) и (6), спектральная эффективность:

$$\gamma = C/F, \text{ бит/с/Гц}, \quad (8)$$

пространственная эффективность:

$$\xi = \left. \begin{aligned} &M/S, \text{ 1/мм}^2, \\ &S = \pi D_{о6}^2 / 4 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Таблица 1. Эффективность различных оптических волокон

D _{об} , мкм	M	ξ, 1/мм ²	γ, бит/с/Гц		
			DP-QPSK	DP-16QAM	DP-64QAM
125	1	81,49	4	8	12
	4	325,9	16	32	48
	12	977,9	48	96	144
250	26	529,7	104	208	312
	65	1324	266	520	780

Пропускная способность кабеля при работе высокоскоростных систем передачи определяется как [4]:

$$C = p \cdot s \cdot M \cdot n \cdot F, \quad (10)$$

где $p = 2$ – число поляризаций;
 s – число бит на символ;
 n – количество пар ОВ в кабеле.

Из выражений (8), (10) следует пропорциональный рост агрегированной спектральной эффективности ОВ с увеличением количества пространственных каналов M . Для рассмотренного выше МКОВ 125 мкм при равном с ООВ пространственном ресурсе S результирующая пространственная эффективность повышается в 4–12 раз. Для МКОВ 250 мкм пространственный ресурс увеличен в четыре раза, результат M выше в 13–65 раз, то есть пространственная эффективность возрастает в 3–16 раз. Оценочные значения эффективности "результат – ресурс", рассчитанные по формулам (8)–(10) для волокон 125 и 250 мкм при форматах модуляции DP-QPSK ($ps = 4$), DP-16QAM ($ps = 8$) и DP-64QAM ($ps = 12$) представлены в табл.1.

Определим условия реализации эффективности "достижимый – требуемый результат" в перспективе развития инфокоммуникаций при цели управления качеством ОК – обеспечении величины пропускной способности пары волокон 1 Пбит/с. Целевая функция $\gamma(x) = C$ имеет в соответствии с (1) аргумент – четырехэлементное подмножество управляемых факторов:

$$X_c = \{x_i | i = \overline{1, 4}, x_1 = ps, x_2 = M, x_3 = n, x_4 = F\}. \quad (11)$$

Эффективность (качество), определенная по (3):

$$W^{np}(x) = \begin{cases} 1 & \text{при } C \geq 1 \text{ Пбит/с,} \\ 0 & \text{при } C < 1 \text{ Пбит/с.} \end{cases} \quad (12)$$

Для одной пары ОВ кабеля варьируемыми факторами являются x_1, x_2, x_4 . Необходимая ширина полосы частот при $\gamma^{TP} = 1000$ Тбит/с в соответствии с (10), (11):

$$x_4 = F = 1000/p \cdot sM, \text{ ТГц.} \quad (13)$$

Оценочные значения требуемой ширины спектра x_4 приведены в табл.2. Строки и столбцы таблицы соответствуют факторам x_1 и x_2 .

Сопоставление данных табл.2 с номинальной шириной оптических диапазонов показывает, что для диапазона S необходимое количество пространственных каналов составляет 26 и 65, для $S+L$ – 12 и 26, для $S+C+L$ – 4 и 12. В стандартном одномодовом волокне ($M=1$) требуемая пропускная способность недостижима, необходимо применение параллельных волокон.

Зависимость $C(F)$ при формате модуляции DP-64QAM для ряда значений M показана на рис.2. Достижение функциями уровня 1 Пбит/с означает обеспечение требуемого качества и пригодной эффективности ОК.

Для 65-канального МКОВ (13 сердцевин, 5 мод) и для 26-канального МКОВ (13 сердцевин, 2 моды) диаметром 250 мкм пропускная способность достигает требуемого

Таблица 2. Ширина спектра F , ТГц, при передаче 1 Пбит/с по одной паре ОВ

Формат модуляции	Количество пространственных каналов M				
	1	4	12	26	65
DP-QPSK	250	62,5	20,8	9,62	3,85
DP-16QAM	125	31,25	10,4	4,81	1,92
DP-64QAM	83,3	20,8	6,94	3,21	1,28

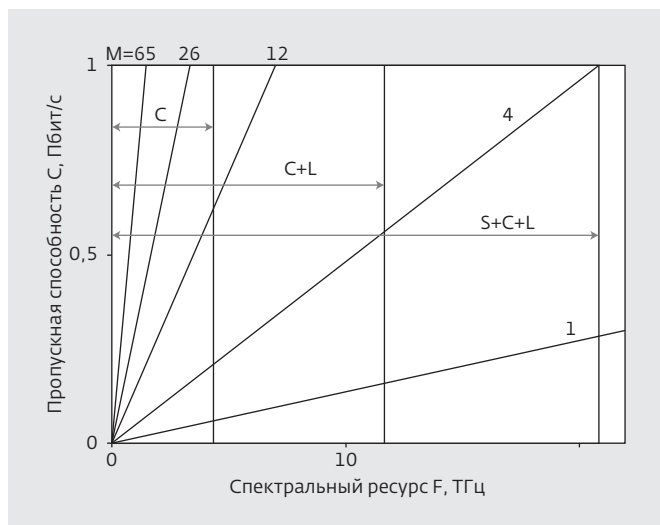


Рис.2. Пропускная способность оптического кабеля для формата модуляции DP-64QAM

результата 1 Пбит/с при работе в оптическом диапазоне C. Для 12-канального (4 сердцевинки, 3 моды) МКОВ стандартного размера 125 мкм этот результат достигается в диапазоне C + L. 4-сердцевинное МКОВ 125 мкм с одномодовыми сердцевинками обладает заданным качеством в спектре S+C+L. Одномодовое кварцевое ОВ не дает возможности реализовать качество C=1 Пбит/с.

Заключение

Взрывной рост телекоммуникационного трафика вызывает востребованность оптических кабелей с многоканальными волокнами. Реализованные МКОВ стандартного размера обеспечивают до 12 пространственных каналов эффективностью 80–1000 1/мм². В МКОВ удвоенного размера реализовано 65 пространственных каналов с эффективностью около 1300 1/мм². При использовании форматов модуляции DP-QPSK, DP-16QAM, DP-64AM в паре таких волокон может быть получена агрегированная спектральная эффективность, соответственно, 50–140 бит/с/Гц и 270–750 бит/с/Гц.

Эффективность вида "достижимый – требуемый результат" аналогична качеству – соответствию характеристик кабеля требованиям. При цели руководства качеством – скорости передачи по паре ОВ 1 Пбит/с для формата модуляции DP-64QAM МКОВ с 26-ю пространственными каналами могут быть использованы в оптическом диапазоне C, с 12 каналами – в диапазоне C+L, с четырьмя каналами – в диапазоне S+C+L.

В перспективе до 2030–2035 года можно ожидать роста экономической эффективности применения МКОВ в ОК на коммерческих линиях связи с реализацией высокого технического потенциала этой новой среды передачи сигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стратегия развития отрасли связи Российской Федерации на период до 2035 года. [Электронный ресурс]. URL: <http://static.government.ru/media/files/Pc7fHuejbnvqv17b0RJNv0RIqTo20IUUV.pdf> (дата обращения 29.02.2024).
2. **Росляков А.В.** Поколения сетей фиксированной связи F1G–F5G // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2023. № 1. С. 36–46.
3. **Marom D., Miyamoto Y., Neilson D.T., Tomkos I.** Optical switching in future fiber-optic networks utilizing spectral and spatial degrees of freedom // Proc. IEEE. 2022. Vol. 110. No. 11. PP. 1835–1852.
4. **Коршунов В.Н., Овчинникова И.А., Шишова Н.А.** Развитие параллелизма в волоконно-оптических системах передачи // Электросвязь. 2023. № 8. С. 34–41.
5. **Ruiz M.** et al. Network traffic analysis under emerging beyond-5G scenarios for multi-band optical technology adoption // J. Opt. Commun. Netw. 2023. Vol. 15. No. 11. PP. F36–F47.
6. **Коршунов В.Н., Шишова Н.А.** Многоканальные оптические волокна для высокоскоростных ВОСП // Вестник связи. 2021. № 6. С. 11–15.
7. **Коршунов В.Н., Овчинникова И.А.** Применение пространственного мультиплексирования при передаче информации по оптическим кабелям // Кабели и провода. 2018. № 1. С. 12–18.
8. Надежность и эффективность в технике. Справочник в 10 т. Т. 3. Эффективность технических систем. М.: Машиностроение, 1988. 328 с.
9. **Дружинин В.В., Конторов Д.С.** Системотехника. М.: Радио и связь, 1985. 200 с.
10. **Верник С.М., Кочановский Л.Н.** Оптимизация линейных сооружений связи. М.: Радио и связь, 1984. 136 с.
11. **Кузовкова Т.А.** Экономика инфокоммуникаций и методология ее научного исследования. М.: МТУСИ, 2016. 196 с.
12. **Мельников В.П., Смоленцев В.П.** Основы обеспечения качества. М.: Буки-Веди, 2016. 538 с.
13. **Белобрагин В.Я.** Введение в науку об управлении качеством. М.: Стандарты и качество, 2021. 460 с.
14. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Система менеджмента качества. Основные положения и словарь.
15. **Sagae Y.** et al. Weakly coupled homogeneous 3-mode 4-core fiber with standard diameter // J. Lightwave Technol. 2023. Vol. 40. No. 12. PP. 3950–3956.
16. **Li Z.** et al. Experimental research of 13-core 5-LPmode fiber with high doped graded-index core and stairway-index trench // Opt. Express. 2023. Vol. 31. No. 9. PP. 15214–15226.



РОССИЙСКИЙ
МЕЖДУНАРОДНЫЙ
РМЭФ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ
ФОРУМ

24-26 АПРЕЛЯ 2024

XXXI МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА



ПРИ ПОДДЕРЖКЕ



ПРАВИТЕЛЬСТВО
САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

ПАРТНЕР



КОНГРЕССНО-ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР
ЭКСПОФОРУМ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ, ПЕТЕРБУРГСКОЕ ШОССЕ, 64/1

ENERGYFORUM.RU
rief@expoforum.ru
+7 (812) 240 40 40, доб. 2626

EXPOFORUM

ENERGETIKA-RESTEC.RU
visit@energetika-restec.ru
+7 (812) 320 63 63, доб. 743



@ENERGYFORUMSPB
САМАЯ АКТУАЛЬНАЯ
ИНФОРМАЦИЯ О РМЭФ
В НАШЕМ TELEGRAM- КАНАЛЕ!

