

*В.Н. Коршунов, д-р техн. наук, профессор кафедры  
«Многоканальные телекоммуникационные системы»  
Московского технического университета связи и информатики*

# УВЕЛИЧЕНИЕ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ПО ОПТИЧЕСКИМ КАБЕЛЯМ

**Аннотация.** Рассматриваются и оцениваются методы и средства увеличения скорости передачи информации по оптическим кабелям. Применяется параметр бодовая эффективность. Даются аналитические выражения для расчета скорости, приводятся примеры.

**Ключевые слова:** оптические кабели, оптические волокна, скорость передачи информации, мультиплексирование, бодовая эффективность.

**Abstract.** Methods and techniques enabling the increase of optical cable data transmission rates are analyzed and estimated. The baud rate parameter is used. Analytic expressions for the rate calculation with examples are given.

**Key words:** optical cables; optical fibers; data transmission rate; multiplexing; baud rate.

Материал поступил в редакцию 18.10.2016  
E-mail: mes@mtuci.ru

Область инфокоммуникаций – телекоммуникаций (электро-связи) и информатики – характеризуется неизменным трендом увеличения объемов и скоростей передачи информации. Основная среда распространения мощных информационных потоков на инфокоммуникационных сетях – оптические кабели (ОК) – находится в центре внимания специалистов кабельной промышленности и отраслевой науки [1–4]. В настоящей работе описаны методы и средства достижения сверхвысоких скоростей передачи инфокоммуникационных сигналов по ОК, приведены аналитические выражения и выполнен расчет для конкретных примеров.

## ИСХОДНАЯ СКОРОСТЬ ПЕРЕДАЧИ

Возможная величина скорости передачи информации по оптическому кабелю определяется характеристиками собственно ОК, а также показателями работающей по кабелю волоконно-оптической системы передачи (ВОСП) – оптической телекоммуникационной системы [5–7].

Информация передается по оптическому волокну (ОВ) физическими импульсами. Каждый импульс характеризуется значениями амплитуды и фазы модулированного несущего оптического колебания, идентифицирующими один из символов используемого информационного алфавита. Последний содержит  $M$  символов, символу соответствует определенная совокупность  $s = \log_2 M$  двоичных единиц информации. Например, в формате модуляции 16QAM (16-ричная КАМ, quadrature amplitude modulation [5]) имеем  $M = 16$ ,  $s = 4$ . Здесь один символ (импульс) несет 4 бита информации, при этом битовая скорость передачи информации  $V$  и скорость передачи символов  $B$  находятся в соотношении  $V \text{ (бит/с)}/B \text{ (Бод)} = 4$ .

Единица символьной скорости бод носит имя Жана Бодо, одного из разработчиков телеграфной аппаратуры в XIX в.,

а символьную скорость (*symbol rate*) называют также бодовой скоростью (*baud rate*). Число бит на символ – символьная эффективность (*symbol efficiency*):

$$s = V/B. \quad (1)$$

Увеличение  $s$  является одним из методов повышения скорости передачи информации по ОК. В коммерческих ВОСП с форматами модуляции QPSK (quadrature phase-shift-keying [5]) и 16QAM символьная эффективность имеет значения 2 и 4, в экспериментальном оборудовании при высокой кратности многопозиционной модуляции она существенно увеличивается. Например, формат 2048QAM характеризуется величиной  $s = 11$  [7].

Максимально достижимые в аппаратуре ВОСП скорости передачи импульсов определяются возможностями современной электроники. Для коммерческих ВОСП они составляют [8] 30...60 ГБод, в экспериментах – несколько выше, в частности [9]: 80...107 ГБод. Таким образом, ориентировочным скоростным пределом бодовой скорости можно считать порядок  $100 \text{ ГБод} = 100 \cdot 10^9$  импульсов в секунду; длительность импульса  $T = 1/B = 10^{-11} \text{ с} = 10$  пикосекунд. При  $B = 100 \text{ ГБод}$  и символьных эффективностях  $s = 2...11$  имеем битовые скорости передачи информации по ОВ  $V = 0,2...1,1 \text{ Тбит/с}$  ( $1 \text{ терабит/с} = 10^{12} \text{ бит/с}$ ).

Дальнейшее увеличение скорости до необходимых в реальной перспективе петабитов в секунду требует эффективного применения методов и средств мультиплексирования – одновременной передачи нескольких информационных потоков. Скорость передачи информации в агрегированном потоке равна сумме скоростей компонентных потоков. Заметим, что кратное превышение битовой скорости  $V$  над бодовой скоростью  $B$  при использовании многопозиционных форматов модуляции также может быть рассмотрено как

мультиплексирование с  $s$  виртуальными компонентными информационными потоками.

### МЕТОДЫ И СРЕДСТВА УВЕЛИЧЕНИЯ СКОРОСТИ

На рис. 1 приведена схема, представляющая принцип реализации высоких скоростей передачи информации по ОК. Начиная от отправной точки – символической скорости  $B$ , скорость передачи информации  $V$  формируется многократным наращиванием за счет применения комплекса технических методов и физических средств. В общем случае используются шесть ступеней мультиплексирования. На каждой ступени  $i$  скорость увеличивается в  $K_i$  раз. Приняты следующие обозначения ступеней увеличения скорости  $i$  и соответствующих коэффициентов мультиплексирования  $K_i$ :

- символическое мультиплексирование,  $K_1 = s, V_1 = sB = V_K$ ;
- спектральное мультиплексирование,  $K_2 = m, V_2 = mV_1 = V_{WDM}$ ;
- поляризационное мультиплексирование,  $K_3 = p, V_3 = pV_2$ ;
- модовое мультиплексирование,  $K_4 = \mu, V_4 = \mu V_3$ ;
- сердцевинное мультиплексирование,  $K_5 = \psi, V_5 = \psi V_4 = V_{OB}$ ;
- волоконное мультиплексирование,  $K_6 = n, V_6 = nV_5 = V_{OK}$ .

Спектральное мультиплексирование (WDM, *wavelength division multiplexing*, мультиплексирование с разделением по длинам волн) реализуется в ВОСП-СР – волоконно-оптических системах передачи со спектральным разделением. Вариант ВОСП-СР – DWDM-системы (*dense WDM*, плотное мультиплексирование) обеспечивает эффективное использование частотного спектра при передаче по волокну и, соответственно, высокие скорости передачи информации. Битовая скорость в спектральном оптическом канале ВОСП-СР  $V_K = V_1 = sB$ . Общая ширина спектра системы:

$$F_{\text{ВОСП-СР}} = mF_{\text{КИ}}, \quad (2)$$

где  $F_{\text{КИ}}$  – канальный интервал, шаг частотной сетки, расстояние между несущими частотами соседних оптических каналов.

Используем понятие бодовая эффективность (*baud efficiency, BE*) – отношение бодовой скорости к ширине занимаемой полосы частот  $F$ . Соответствующий параметр

$$\gamma_B = BE = B/F, \text{ Бод/Гц.} \quad (3)$$

Для ВОСП-СР бодовая эффективность – отношение символической скорости в спектральных каналах к ширине канального интервала:

$$\gamma_B = B/F_{\text{КИ}}, \text{ Бод/Гц.} \quad (4)$$

С применением параметра бодовая эффективность (3), (4) и формул (1), (2) получаем общую скорость передачи информации по одномодовому ОВ при использовании спектрального мультиплексирования:

$$V_{\text{WDM}} = V_2 = mV_K = s \cdot \gamma_B \cdot m \cdot F_{\text{КИ}} = s \cdot \gamma_B \cdot F_{\text{ВОСП-СР}}. \quad (5)$$

Примеры реализованных значений  $F_{\text{КИ}}$ ,  $B$  и  $\gamma_B$ :

- $F_{\text{КИ}} = 50$  ГГц;  $B = 32$  ГБод;  $\gamma_B = 0,64$  Бод/Гц;
- $F_{\text{КИ}} = 33,3$  ГГц;  $B = 32$  ГБод;  $\gamma_B = 0,96$  Бод/Гц;
- $F_{\text{КИ}} = 50$  ГГц;  $B = 56$  Гбод [10];  $\gamma_B = 1,12$  Бод/Гц;
- $F_{\text{КИ}} = 25$  ГГц;  $B = 30$  Гбод [11];  $\gamma_B = 1,20$  Бод/Гц.

Рассмотрим конкретный вариант оценки величины битовой скорости ВОСП-СР (включая передачу клиентской

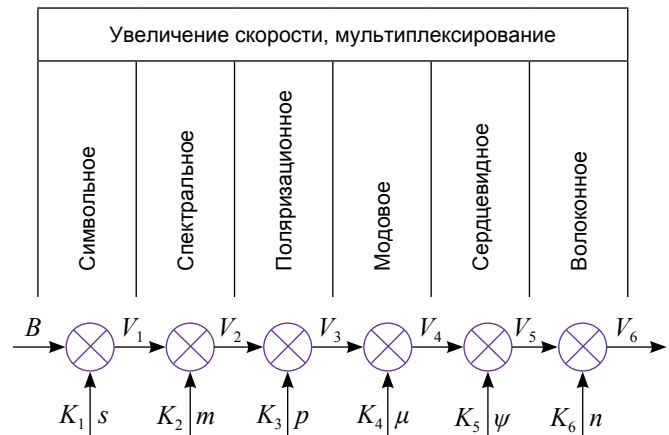


Рис. 1. Концептуальная схема формирования скорости

информации, избыточность кодирования и служебные биты), приняв  $\gamma_B = 1$  Бод/Гц и  $s = 6$ , при использовании оптического диапазона  $C + L$  [1, 12] шириной 11,5 ТГц. Для этого случая  $V_2 = 6 \cdot 1 \cdot 11,5 \approx 70$  Тбит/с.

Третья ступень концептуальной схемы – поляризационное мультиплексирование – представляет метод разделения компонентных оптических сигналов в пространстве посредством их передачи с двумя взаимно перпендикулярными поляризациями (поляризация волны – пространственная направленность поперечных колебаний ее электрического поля),  $p = 2, V_3 = 2V_2$ . В приводящемся примере получаем агрегированную скорость  $V_3 = 2 \cdot 70 = 140$  Тбит/с.

Значительное увеличение достижимой скорости передачи информации по ОВ ожидается с освоением методов пространственного мультиплексирования, модового и сердцевинного — SDM, *space (spatial) division multiplexing* (мультиплексирование с разделением в пространстве).

Модовое мультиплексирование осуществляется в маломодовых ОВ, имеющих больший поперечный размер сердцевины по сравнению с одномодовыми волокнами и благодаря этому обеспечивающих распространение  $\mu$  типов волн. В частности, в трехмодовом волокне наряду с основной модой  $LP_{01}$  передаются две вырожденные моды  $LP_{11a}$  и  $LP_{11b}$  [7]; в шестимодовом ОВ к этим волнам добавляются  $LP_{21a}$ ,  $LP_{21b}$  и  $LP_{02}$ . На каждой волне переносится компонентный поток информации ВОСП-СР, в агрегированном потоке скорость увеличивается в  $\mu$  раз. При использовании шестимодового мультиплексирования  $V_4 = 6 \cdot 40 = 840$  Тбит/с.

Среда реализации сердцевинного мультиплексирования – многосердцевинные ОВ [13], они содержат  $\psi$  сердцевин, например,  $\psi = 7$  и  $\psi = 12$  [7, 14]. По каждой сердцевине передается компонентный поток информации, результирующая скорость возрастает  $\psi$ -кратно. Конструкция и профиль показателя преломления 12-сердцевинного ОВ с квадратно-решетчатой структурой и разнотипными сердцевинами показаны на рис. 2.

Разнотипность сердцевин  $a$  и  $b$  создает рассогласование фазовых параметров процессов распространения и снижает взаимные влияния. Двухступенчатый характер профиля показателя преломления способствует выравниванию скоростей распространяющихся мод и уменьшает дифференциальную модовую задержку. Канавка выполняет функцию ограничения поля, снижая связь между сердцевинами и уменьшая потери сигнала на границе оптической оболочки. Конструктивные параметры сердцевин даны в табл. 1.

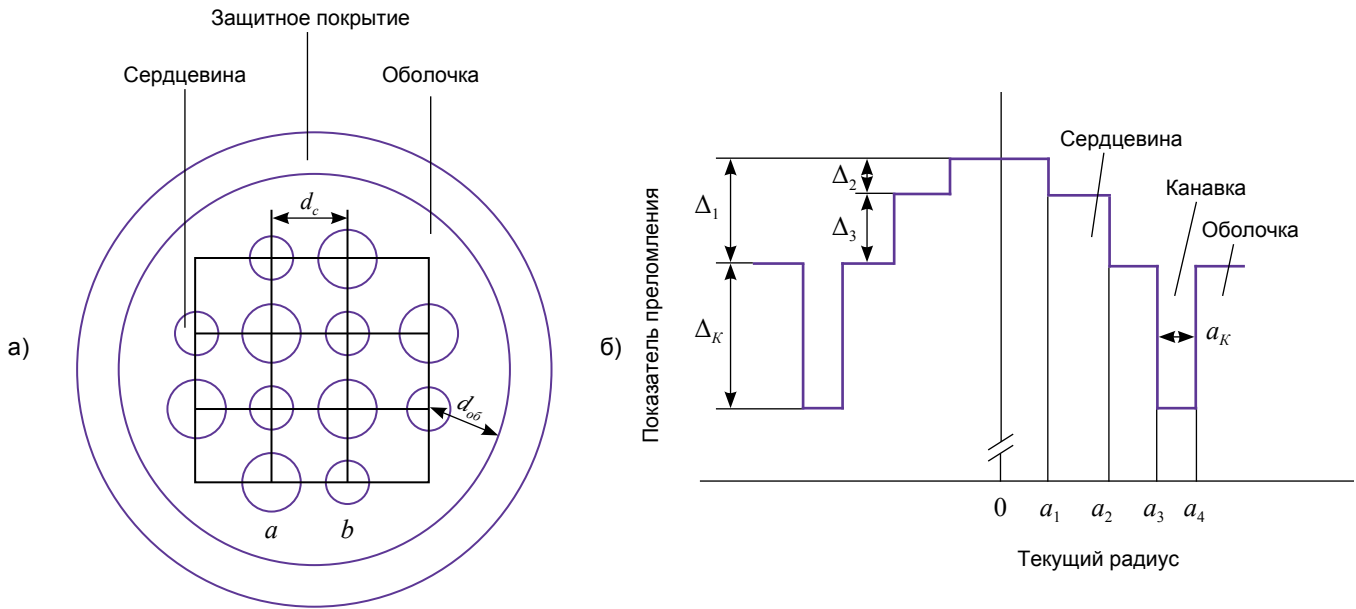


Рис. 2. К сердцевинному мультиплексированию: конструкция (а) и профиль показателя преломления (б) 12-сердцевинного ОВ

Таблица 1

Параметры сердцевин 12-сердцевинного ОВ

Тип	$a_2$ , мкм	$\frac{a_2}{a_1}$	$\frac{a_K}{a_2}$	$\Delta_2, \%$	$\frac{a_3}{a_2}$	$\Delta_3, \%$	$\Delta_K, \%$
а	7,3	1,9	0,60	0,138	1,8	0,35	-0,7
б	7,1	2,1	0,71	0,114			

Шаг размещения сердцевин  $d_c = 41$  мкм; глубина от края оптической оболочки  $d_{об} = 50$  мкм; диаметр по оптической оболочке 230 мкм; диаметр по защитному покрытию 340 мкм.

Многосердцевинное мультиплексирование с числом сердцевин  $\psi = 12$  позволяет увеличить полученное выше значение скорости до  $V_{ОВ} = V_5 = 12 \cdot 840 = 10$  Пбит/с (1 петабит =  $10^{15}$  бит).

И, наконец, волоконное мультиплексирование означает передачу компонентных потоков по  $n$  парам параллельных волокон (при обеспечении двусторонней передачи информации посредством использования двух ОВ): отдельных ОВ кабеля или групп компонентных волокон в пучках, лентах, предназначенных для образования агрегатных потоков информации.

РАСЧЕТ СКОРОСТИ

Интегральный коэффициент увеличения скорости (интегральный коэффициент мультиплексирования)

$$K_{ИИТ} = \prod_{i=1}^6 K_i = s \cdot m \cdot \mu \cdot p \cdot \psi \cdot n. \tag{6}$$

Скорость в кабеле:

$$V_{ОК} = K_{ИИТ} \cdot B = s \cdot m \cdot \mu \cdot p \cdot \psi \cdot n \cdot B. \tag{7}$$

Если некоторые механизмы увеличения скорости (ступени  $i$  на рис. 1) в конкретных вариантах использования ОК не применяются, то в (6), (7) для них  $K_i = 1$ .

Рассмотрим случай работы по кабелю однопольных ВОСП-СР при фиксированной частотной сетке с каналным интервалом  $F_{КИ}$ . По (4) имеем  $F_{КИ} = B/\gamma_B$ , таким образом, согласно (2),  $F_{ВОСП-СР} = m B/\gamma_B$ , и в (7) можно сделать замену  $m B = \gamma_B F_{ВОСП-СР}$ :

$$V_{ОК} = s \cdot \mu \cdot p \cdot \psi \cdot n \cdot \gamma_B \cdot F_{ВОСП-СР}. \tag{8}$$

Если принять

$$\gamma_B = 1, \tag{9}$$

то получаем оценочную величину скорости

$$V_{ОК}^* = s \cdot \mu \cdot p \cdot \psi \cdot n \cdot F_{ВОСП-СР}. \tag{10}$$

Скорость передачи информации по одной паре ОВ ( $n = 1$ ):

$$V_{ОВ} = s \cdot \mu \cdot p \cdot \psi \cdot \gamma_B \cdot F_{ВОСП-СР}; \tag{11}$$

$$V_{ОВ}^* = s \cdot \mu \cdot p \cdot \psi \cdot F_{ВОСП-СР}. \tag{12}$$

Относительная погрешность расчета скорости  $V^*$  (10), (12) вследствие принятия допущения (9):  $\delta^* = |(B/F_{КИ}) - 1|$ .

В табл. 2 приведены результаты расчета [15] скорости передачи по оптическому кабелю для коэффициентов мультиплексирования:  $s = 4$ ,  $\mu = 3$ ,  $p = 2$ ,  $\psi = 7$ ,  $n = 1$  и полосы частот  $F_{ВОСП-СР} = 11,5$  ТГц (здесь  $V = V_{ОВ} = V_{ОК}^*$ ,  $V^* = V_{ОВ}^* = V_{ОК}^*$ , так как  $n = 1$ ).

Таблица 2

**Данные расчета скорости передачи информации по оптическому кабелю**

$F_{кв}$ , ГГц	$B$ , ГБод	$\gamma_B$ , Бод/Гц	$V$ , Пбит/с	$V^*$ , Пбит/с	$\delta^*$
50	32	0,64	1,24	1,93	0,36
33,3	32	0,96	1,85		0,04
50	56	1,12	2,16		0,12
25	30	1,20	2,32		0,20

Выбор формул (8), (11) или (10), (12) определяется требованиями к точности экспресс-расчета скорости передачи информации по ОК.

В рассмотренных выше примерах (табл. 2 и расчеты в предшествующем разделе) скорость передачи информации по одной паре волокон оптического кабеля при использовании комплексного мультиплексирования составляет 2 Пбит/с и 10 Пбит/с. Следует отметить, что реализация методов и средств пространственного мультиплексирования связана с определенными сложностями устранения взаимных влияний между модами и между сердцевинами во избежание недопустимых перекрестных помех. При модовом мультиплексировании это приводит к необходимости уменьшения числа мод и дальности связи, при сердцевинном – к уменьшению количества сердцевин в ОВ. Реально достижимой на современном этапе можно считать величину скорости передачи информации по оптическому волокну порядка 1 Пбит/с. Сюда, в частности, относится скорость для примера по табл. 2 (2 Пбит/с) и в 3 раза меньшая скорость для того же примера при неиспользовании модового мультиплексирования (0,7 Пбит/с).

Приведенные выше формулы дают оценочные величины скорости. Они позволяют определить вклад каждого вида

мультиплексирования, реализуемого в кабеле и в аппаратуре, в формирование общей скорости передачи информации по оптическому кабелю.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Необходимость увеличения скорости передачи информации по оптическим кабелям обусловлена растущими потребностями общества в инфокоммуникационных услугах. Решение проблемы осуществляется во взаимосвязи совершенствования оптических кабелей и телекоммуникационных систем, основой является комплексное мультиплексирование информационных потоков. В приведенных примерах рассчитанная величина скорости передачи информации по одной паре волокон оптического кабеля составляет 2 Пбит/с и 10 Пбит/с. Реально достижимыми на современном этапе можно считать скорости порядка 1 Пбит/с. Для экспресс-оценки технических решений оптических кабелей, аппаратуры и сетевых решений, в условиях многообразия исходных положений и вариантов реализации могут быть использованы приведенные в статье формулы и результаты. Применение параметра бодовая эффективность (3), (4) позволяет в общем виде задавать исходные данные расчета скорости передачи информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пешков И.Б. Материалы кабельного производства. – М.: Машиностроение, 2013. – 456 с.
2. Ларин Ю.Т. Оптические кабели: методы расчета конструкций. Материалы. Надежность и стойкость к ионизирующему излучению. – М.: Престиж, 2006. – 304 с.
3. Воронцов А., Сандалов А. Состояние и перспективы развития кабельной промышленности в России // Технологии и средства связи. – 2016. – № 1. – С. 34–37.
4. Овчинников А.А., Овчинникова И.А., Семенов П.А. О возможности применения оптических кабелей в условиях воздействия ионизирующих излучений // Кабели и провода. – 2016. – № 3. – С. 14–16.
5. Коршунов В.Н. Скорость передачи информации по оптическим магистральным кабелям // Кабели и провода. – 2014. – № 3. – С. 15–20.
6. Гордиенко В.Н., Коршунов В.Н., Шишова Н.А. Скоростные параметры оптических телекоммуникационных систем // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – Т. 9, № 11. – С. 32–37.
7. Гордиенко В.Н., Коршунов В.Н., Шишова Н.А. Повышение скорости волоконно-оптических систем передачи // Электросвязь. – 2016. – № 5. – С. 27–33.
8. Леонов А., Слепцов М., Трещиков В. Развитие скоростных DWDM – систем по нескольким поднесущим // Первая миля. – 2016. – № 2. – С. 42–48.
9. Raybon G. et al. High symbol rate coherent optical transmission systems: 80 and 107 Gbaud // Journal of Lightwave Technology. – 2014. – Vol. 32, № 4. – P. 824–831.
10. Li L. et al. 20x224 Gbps (56 Gbaud) PDM-QPSK transmission in 50 GHz grid over 3040 km G.652 fiber and EDFA only link using soft output faster than Nyquist technology // Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (San Francisco, USA, 09–13 March 2014). – San Francisco, 2014. – Vol. 3. – P. 2256–2258.
11. Morita I. et al. Trans-oceanic class ultra-long-haul transmission using multi-core fiber // Optics Express. – 2014. – Vol. 22, № 26. – P. 31761–31773.
12. Коршунов В.Н. Пропускная способность оптического кабеля // Кабели и провода. – 2009. – № 1. – С. 32–35.
13. Дианов Е.М., Семенов С.Л., Буфетов И.А. Новое поколение волоконных световодов // Квантовая электроника. – 2016. – Т. 46, № 1. – С. 1–10.
14. Sasaki Y. et al. Few-mode multicore fiber with 36 spatial modes (three modes (LP<sub>01</sub>, LP<sub>11a</sub>, LP<sub>11b</sub>)x12 cores) // J.Lightw.Technol. – 2015. – Vol. 33, № 5. – P. 964–970.
15. Коршунов В.Н., Шишова Н.А. К расчету скорости ВОСП-СР // Труды конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы» Международного форума информатизации МФИ-2016. – М.: МТУСИ, 2016. – С. 69–71.