

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

**Аннотация.** Оценены методы обеспечения высоких скоростей передачи информации по оптическим кабелям. Охарактеризованы высокоэффективные форматы модуляции для систем 100G и выше. С использованием предела Найквиста выполнен расчет канальной скорости оптической кабельной системы передачи. Определены максимальные скорости передачи информации по оптическому волокну с применением нелинейного предела Шеннона.

**Ключевые слова:** оптический магистральный кабель, оптическое волокно, скорость передачи информации, предел Найквиста.

**Abstract.** Methods for ensuring high rates of optical cable data transmission are estimated. High efficiency modulation formats for 100G and above systems are characterized. Optical cable system channel transmission rate was calculated using Nyquist limit. Maximum optical fiber data transmission rates were determined using nonlinear Shannon limit.

**Key words:** trunk optical cable, optical fiber, data transmission rate, Nyquist limit.

Материал поступил в редакцию 27.03.2014  
E-mail: mes@mtuci.ru

## СКОРОСТЬ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ ПО ОПТИЧЕСКИМ МАГИСТРАЛЬНЫМ КАБЕЛЯМ

Прогресс в области телекоммуникационных и информационных технологий проходит нарастающими темпами; уже сегодня формируется информационный мир [1]. Наилучшие условия транспортирования больших объемов информации создаются линиями передачи на оптических волокнах [2] в составе оптических кабелей [3] совместно с аппаратурой оптических телекоммуникационных систем [4].

Экономическая эффективность оптических транспортных магистралей находится в прямой зависимости от пропускной способности [5] оптического кабеля (ОК) с определяющим фактором – скоростью передачи информации по оптическому волокну (ОВ). В связи с этим в России и за рубежом проводится активная разработка технологий высокоскоростной передачи информации по ОК [6–8 и др.]. В настоящей работе рассматриваются и оцениваются ключевые аспекты этих технологий. Для количественной характеристики процессов используются следующие обозначения физических величин:  $V$  – скорость передачи информации, битовая скорость, бит/с;  $B$  – скорость передачи символов, число символов в секунду, символьная или бодовая скорость, Бод;  $f$  – частота, Гц;  $F$  – ширина полосы частот, Гц;  $\lambda$  – длина волны, м;  $\Delta$  – ширина полосы длин волн, м.

### Тенденция роста скорости

В области инфокоммуникаций ОК играют роль прорывной технологии, обеспечивая возможность передачи практически неограниченных объемов информации с высокими скоростями [9]. В мировой практике на магистральных, опорных сетях трафик (поток информации) растет экспоненциально со скоростью 30...60 % в год для различных географических регионов и сетевых операторов. В логарифмической мере это составляет 1,1...2 дБ

в год. Например, для скорости 30 % имеем  $10 \lg 1,3 = 1,14$  дБ. Ожидается повышение скорости роста трафика в связи с увеличением потребности в передаче цифровой информации. Здесь можно указать перспективы Интернета вещей (Рекомендация Y.2060 МСЭ-Т Overview of Internet of Things) с клиентской базой устройств, приборов, баз данных, виртуальных объектов, взаимодействующих между собой без участия человека, и Всеобъемлющего интернета – Internet of Everything, IoE [10].

В настоящее время на отечественной сети связи массовое применение имеет скорость передачи информации по ОК 10 Гбит/с (10 G). Осуществляется переход [11] на скорости 40 Гбит/с (40 G) и 100 Гбит/с (100 G), причем отечественный производитель – компания Т8 планирует в 2015 г. создать систему передачи 400 G с общим потенциалом до 80 Тбит/с (1 терабит =  $10^3$  Гбит =  $10^{12}$  бит) в C + L диапазоне (1530...1565 нм + 1565...1625 нм).

При передаче больших объемов информации по ОВ осуществляется принцип спектрального разделения (wave division multiplexing, WDM, уплотнение с разделением по длинам волн): агрегатный поток информации содержит ряд компонентных потоков, транспортируемых в спектрально разделенных оптических каналах. Суммарная скорость передачи информации по волокну, включая клиентскую информацию и служебную информацию (дополнительные биты синхронизации, форматирования, корректирования ошибок и т.д.), определяется скоростью в спектральном канале  $V_k$  и числом каналов  $m$  в используемом диапазоне длин волн.

Определяющим фактором достижения высокой канальной скорости является большая величина спектральной эффективности SE (spectral efficiency):

$$\gamma = SE = V_k / F_{\text{кн}}, \quad (1)$$

где  $F_{\text{кн}}$  – канальный интервал, шаг частотной сетки – расстояние на шкале частот между центральными частотами смежных оптических каналов.

Международный союз электросвязи, сектор стандартизации электросвязи МСЭ-Т (International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector ITU-T) рекомендует шаги частотной сетки: 100 ГГц, 50 ГГц, 25 ГГц (0,8 нм; 0,4 нм; 0,2 нм), применяется также нестандартный интервал 33 Гц. Отметим два аспекта:

- теоретический предел пропускной способности волоконно-оптической системы передачи со спектральным разделением (ВОСП-СР) не зависит от шага частотной сетки, а определяется общей шириной спектра ВОСП-СР  $mF_{\text{кн}}$ ; например, ширина частотного спектра оптического диапазона C + L 1625 – 1530 = 95 нм составляет около 12 терагерц, и это значение участвует в вычислении предела Шеннона независимо от количества каналов и канального интервала;

- при поляризационном мультиплексировании, когда по волокну передаются одновременно два потока информации на взаимно перпендикулярных поляризациях распространяющейся электромагнитной волны, соответственно увеличиваются с коэффициентом  $r = 2$  значения скорости  $V_k$  и спектральной эффективности  $\gamma$ . Например, при спектральной эффективности на одну поляризацию  $5 \frac{\text{бит/с}}{\text{Гц}}$  и двухполяризационном мультиплексировании может быть достигнута общая скорость ВОСП-СР для диапазона C + L:  $V_{\text{ВОСП-СР}} = 2 \cdot 2 \cdot 12 = 120 \text{ Тбит/с}$ .

На рис. 1 показана эволюция во времени экспериментально достигнутой спектральной эффективности на поляризацию: имеет место рост показателя со скоростью 1 дБ/год. Ожидается дальнейшее снижение темпа роста реализуемой спектральной эффективности ВОСП-СР ввиду деградиационного действия межканальных помех нелинейного происхождения, усиливающегося с увеличением мощности полезного сигнала и обусловливающего так называемый нелинейный предел Шеннона [12] (см. далее одноименный раздел).

Реализуемая величина спектральной эффективности систем передачи по оптическим кабелям определяется константным фактором – пределом Найквиста и варьируемым фактором – форматом модуляции.

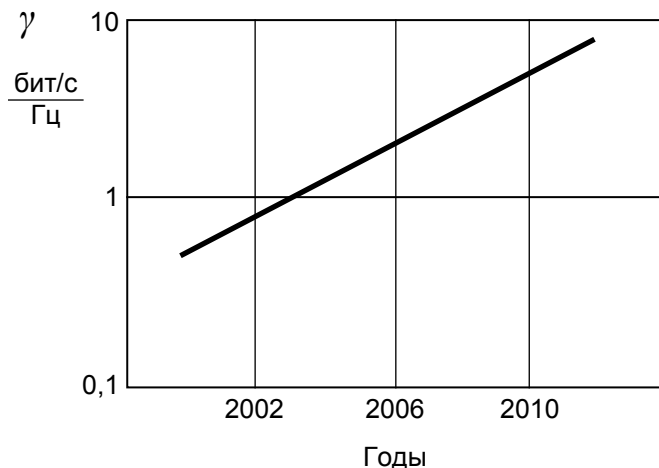


Рис. 1. Эволюция спектральной эффективности ВОСП (на поляризацию)

### Предел Найквиста

Предел Найквиста сопоставляет максимально возможную символьную скорость  $B$  с шириной используемой для передачи полосы частот  $F$ . Данное соотношение принадлежит к основам теории передачи дискретных сигналов, разработанным Х. Найквистом в 20-х годах прошлого века при исследовании процессов телеграфирования [13, 14].

Количественную величину предела Найквиста можно получить на наглядном примере передачи сигнала типа «меандр» (точки кода Морзе) – двоичной последовательности ...101010... с символами в виде прямоугольных импульсов постоянного тока: токовых и бестоковых посылок, соответственно  $u(t) = U$  и  $u(t) = 0$ , рис. 2а.

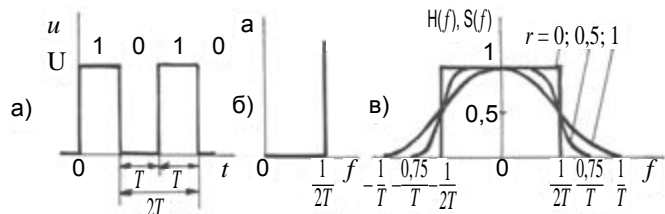


Рис. 2. К иллюстрации предела Найквиста: а – сигнал «меандр»; б – идеальный ФНЧ; в – фильтр и спектр вида приподнятого косинуса.

Здесь  $T$  – длительность символа, тактовый интервал; таким образом, скорость передачи символов равна  $B = 1/T$  символов в секунду (бод). Такой сигнал содержит постоянную составляющую  $U/2$  и нечетные гармоники с частотами  $f_1 = 1/2T, f_3 = 3/2T, f_5 = 5/2T$  и т. д. Если этот сигнал передать по каналу с частотной характеристикой затухания вида идеального фильтра нижних частот (ФНЧ):  $a = 0$  при  $0 \leq f \leq 1/2T, a = \infty$  при  $f > 1/2T$  (рис. 2б), то на выходе будет 1-я гармоника с частотой  $1/2T$ , совпадающая по времени с исходным сигналом. В результате передаваемая информационная последовательность может быть достоверно идентифицирована на приеме. Через идеальный ФНЧ пройдут также все меандр-сигналы с частотами меньше  $1/2T$  и не пройдут сигналы с частотами выше  $1/2T$ .

Следовательно, верхним пределом для скорости передачи символов в виде импульсов постоянного тока  $B = 1/T$  (на примере – для сигнала «меандр», а в реальности для любой информационной последовательности) является величина, равная полосе частот, предоставленной для передачи:  $F = 1/2T$ . Данное соотношение между  $B$  и  $F$  – «два бода на герц» – предел Найквиста для сигналов постоянного тока:  $B/F = 2 \text{ Бод/Гц}$ .

В случае, когда передаются импульсы, заполненные несущим колебанием (амплитудная модуляция или манипуляция – АМ; фазовая модуляция или манипуляция – ФМ), спектр сигнала содержит частоту несущей и две боковые полосы, поэтому имеет в два раза большую ширину. Поэтому для передачи символов со скоростью  $B = 1/T$  требуется в два раза более широкая полоса частот:  $F = 1/2T$ . В этом случае, относящемся в частности к ВОСП-СР, предел Найквиста для сигналов переменного тока составляет один бод на герц:  $B/F = 1 \text{ Бод/Гц}$ , то есть максимально допустимая бодовая скорость передачи информации по оптическому волокну равна ширине используемой полосы частот.

Существует классификация разновидностей ВОСП-СР [15], имеющая, в частности, для идентифицирования сверхплотных WDM критерий – величину предела Найквиста  $B/F = 1 \text{ Бод/Гц}$ , (табл. 1).

**Классификация ВОСП-СП**

<i>F/B</i> , Гц/Бод	Тип ВОСП-СП	Пример скоростей при шагах сетки
> 50	CWDM	10 Гбит/с при 20 нм
> 5	WDM	10 Гбит/с при 100 ГГц
$1,2 < F/B \leq 5$	DWDM	28 Гбод при 50 ГГц
$1 < F/B \leq 1,2$	WDM «квази-Найквист»	28 Гбод при 33 ГГц
1	WDM Найквиста	28 Гбод при 28 ГГц
$\leq 1$	WDM «супер-Найквист»	28 Гбод при 25 ГГц

В табл. 1 приняты обозначения: CWDM – coarse WDM, редкая (крупноинтервальная) WDM с каналным интервалом  $F_{\text{кн}} = 20$  нм для сетей с относительно невысоким трафиком; DWDM – dense WDM, плотная WDM.

Отметим, что рассмотренный выше пример сигнала «меандр» является не более, чем иллюстрацией. При передаче случайной последовательности двоичных единиц через идеальный ФНЧ каждый прямоугольный импульс принимает вид функции  $\sin x/x$  и получает длительное продолжение («хвост»), создающее помеху для других символов -межсимвольную интерференцию (МСИ). При плавном изменяющейся частотной характеристике фильтра спектр импульса расширяется, но укорачиваются «хвосты» и снижается МСИ.

На рис. 2в показаны коэффициент передачи  $H(f)$  и частотный спектр  $S(f)$  вида приподнятого конуса (фильтр Найквиста, импульс Найквиста) с параметром  $r$ ;  $0 \leq r \leq 1$ . От величины  $r$  зависит крутизна спада и ширина полосы частот. При  $r = 0$  это идеальный фильтр, узкая полоса частот и длинный «хвост» временной функции; при  $r = 1$  частотная характеристика имеет форму косинуса, поднятого на величину своей амплитуды, широкую полосу частот и короткий «хвост»; при  $r = 0,5$  – кореньквадратичный приподнятый косинус, распространенный компромиссный вариант. Реализуемые значения  $r$  для ВОСП-СП: 0,5; 0,3; 0,01. Ширина полосы частот фильтра и спектра

$$F = (1/T)(1 + r). \tag{2}$$

Обратившись к рис. 2а, заметим, что здесь представлен сигнал с двумя символами, имеющими уровни 0,  $U$  (это – алфавит сигнала, размер алфавита  $M = 2$ ), каждый символ несет одну двоичную единицу информации, то есть передается 1 бит на символ, и  $V$  (бит/с) =  $B$  (Бод). Если использовать четыре уровня, например с алфавитом символов 0,  $U/3$ ,  $2U/3$ ,  $U$  (размер алфавита  $M = 4$ ), то каждый символ будет содержать две единицы информации: 00, 01, 10, 11, то есть  $V = 2 \cdot B = \log_2 4 \times B$ . Аналогичные соотношения битовой и бодовой скоростей справедливы для двухпозиционной (бинарной) и четырехпозиционной (квадратурной, квадратичной, от латинского слова *quadrant* – четырехугольный, квадрат) фазовой модуляции (манипуляции). В общем случае

$$V = \log_2 M \times B = sB, \tag{3}$$

где  $M$  – размер алфавита;  $s = V/B = \log_2 M$  – символьная эффективность, число бит на символ.

При  $M = 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256$  имеем  $s = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ . Увеличение  $M$  повышает скорость передачи в  $s$  раз, но снижает помехоустойчивость из-за малого различия символов. Компромиссными значениями являются  $M = 4$  и 16.

**Форматы модуляции**

Формат модуляции ВОСП-СП – это вид канального сигнала при передаче по кабелю. В настоящее время основные форматы для скоростей 100 Г и выше: PDM-QPSK (DP-QPSK) и PDM-16QAM (DP-16QAM). Приведенные обозначения имеют следующую расшифровку и смысл:

- PDM (polarization division multiplexing), DP (dual polarization), поляризационное мультиплексирование, двойная поляризация, передача двух потоков информации посредством объединения двух электромагнитных волн с поляризацией (направленностью колебаний напряженности электрического поля волны), взаимно различающейся на  $90^\circ$  при вводе в ОБ, и последующего разветвления этих компонентных волн с раздельным приемом перенесенной ими информации; благодаря этому суммарная скорость передачи информации и спектральная эффективность системы увеличивается с коэффициентом  $p = 2$ ;

- QPSK (quadrature phase-shift-keying), квадратурная, то есть четырехпозиционная манипуляция фазового сдвига, при передаче последующего символа оптическая несущая получает сдвиг фазы в одно из четырех ( $M = 4$ ) значений:  $\varphi = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  и  $270^\circ$ ;

- 16QAM, 16-ричная QAM (quadrature amplitude modulation), квадратурная амплитудная модуляция KAM, комбинация фазовой и амплитудной модуляций, осуществляемых с применением косинусоидальной и синусоидальной несущих (имеющих разность фаз  $90^\circ$ ; здесь лингвистическое происхождение термина «квадратурная»: у геометрического квадрата – величина угла  $90^\circ$ ).

На рис. 3а, б показаны диаграммы состояний ансамбля сигналов QPSK и 16QAM – сигнальные созвездия. В этих диаграммах алфавит сигнала представляют сигнальные точки на комплексной плоскости, которые расположены в конце вектора из начала вещественной  $Re$  и мнимой  $Im$  осей координат. Длина вектора  $a$  – амплитуда сигнала, а угол  $\varphi$  с вещественной осью – его фаза. Четыре символа QPSK ( $M = 4$ ) имеют одинаковую амплитуду, поэтому созвездие размещается на окружности, каждая точка представляет два бита информации. В 16QAM созвездие содержит 16 сигнальных точек ( $M = 16$ ) и имеет решетчатую структуру. Точки несут по четыре бита информации, несколько примеров показаны на рисунке. Можно видеть, что символы имеют три различные амплитуды  $a_1, a_2$  и  $a_3$  (AM) и двенадцать значений фазы (ФМ).

Пример сигнала QPSK приведен на рис. 3в, иллюстрирующем передачу информационной последовательности 1100 двумя символами, на границе которых напряженность электрического поля  $E(t)$  получает сдвиг по фазе на  $180^\circ$ . Заметим, что здесь изображен один период оптической несущей на тактовом интервале  $T$ , тогда как реальное количество периодов – величина порядка  $10^4$ . В QPSK символьная эффективность  $s = \log_2 M = 2$ . В 16QAM  $s = 4$ , благодаря этому битовая скорость в два раза выше.

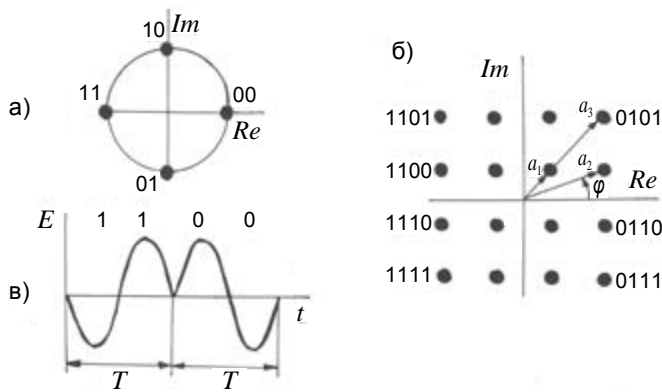


Рис. 3. Диаграммы состояний QPSK (а) и 16QAM (б); характер сигнала QPSK (в)

Однако при той же мощности сигнала меньше евклидово расстояние между точками созвездия и поэтому при наличии помех увеличивается коэффициент ошибок по битам  $K_{\text{ош}} = \text{BER}$  (bit error ratio). Применение корректирующих кодов с исправлением ошибок (forward error correction, FEC) позволяет ценой включения в передаваемый сигнал дополнительных бит (с избыточностью 7...25 %) снижать величину  $K_{\text{ош}}$  с  $10^{-3}$  до  $10^{-10}$ ... $10^{-15}$ . Можно видеть, что компромисс между уменьшением доли клиентской скорости в общей скорости передачи информации из-за FEC и повышением общей скорости за счет увеличения  $s$  обеспечивает в целом положительный результат.

**Расчет скорости передачи**

Совокупная скорость передачи информации по ОК определяется символьной скоростью, которая умножается на коэффициенты мультиплексирования. При работе по ОК одноплатных ВОСП-СР скорость передачи информации по кабелю

$$V_{\text{ок}} = n \cdot m \cdot p \cdot s \cdot B, \tag{4}$$

где  $n$  – число пар ОВ, задействованных для работы систем передачи;  $m$  – число спектральных каналов ВОСП-СР;  $p$  – коэффициент поляризационного мультиплексирования;  $s$  – символьная эффективность;  $B$  – символьная (бодовая) скорость в спектральном канале.

Если по ОК работают разнотипные ВОСП, то соответствующим образом суммируются скорости, создаваемые этими системами передачи. Для расчета  $B$  воспользуемся параметрами спектрального разделения оптических каналов, приведенными на рис. 4.

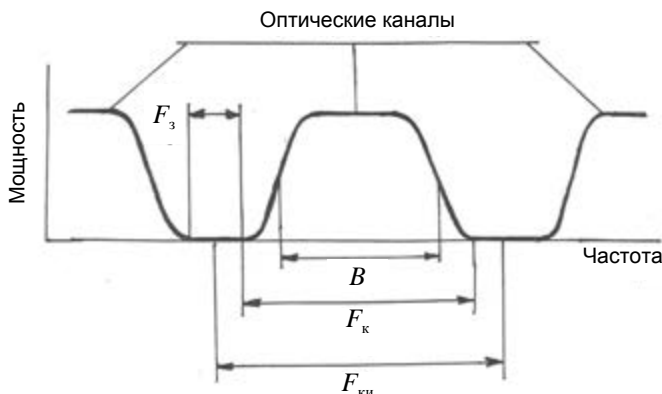


Рис. 4. Фрагмент спектра сигнала в кабеле

Здесь спектр оптического канала имеет форму приподнятого косинуса. Его ширина в герцах на уровне мощности 0,5 согласно пределу Найквиста определяет применяемую символьную скорость  $B$  в бодах. Полная ширина полосы частот оптического канала в соответствии с (2):

$$F_{\text{к}} = B(1 + r); \tag{5}$$

с учетом защитного промежутка между каналами имеем

$$F_{\text{к}} = F_{\text{кн}} - F_{\text{з}}. \tag{6}$$

Из (5), (6) находим бодовую скорость:

$$B = \frac{F_{\text{кн}}}{(1+r)(1+(F_{\text{з}}/F_{\text{к}}))} \tag{7}$$

Для частотной сетки ВОСП-СР с шагом  $F_{\text{кн}} = 50$  ГГц, при  $F_{\text{з}}/F_{\text{к}} = 0,2$  и  $r = 0,5$  в случае канального спектра в форме кореньквадратичного приподнятого косинуса, по формуле (7) определяем:  $B = 28$  ГБод – типовое значение бодовой скорости систем 100G (табл. 1). Для формата модуляции PDM – QPSK ( $s = 2, p = 2$ ) может быть рассчитана канальная скорость системы 100 G:  $V_{\text{к}} = 2 \cdot 2 \cdot 28 = 112$  Гбит/с, реализованная, например, в [16]. Умножив  $V_{\text{к}}$  на  $nm$ , согласно (4) получаем скорость передачи информации по оптической кабельной магистрали. Положим, что ВОСП-СР имеет десять оптических каналов, а в кабеле задействованы две пары ОВ. Тогда  $V_{\text{к}} = 2 \cdot 10 \cdot 112 = 2240$  Гбит/с = 2,24 Тбит/с =  $2,24 \cdot 10^{12}$  бит/с.

Представляет интерес сопоставление вклада частных факторов в формирование величины скорости передачи информации по ОК (4) при заданной общей ширине полосы частот  $F$  или длин волн  $\lambda$ . Здесь  $p = 2$  – неизменный фактор;  $mB$  – малоизменяемый фактор, так как эта величина близка к общей полосе частот системы передачи на магистральной линии. При заданном количестве пар волокон  $n$  основным вариационным фактором является символьная эффективность  $s$ . Повышение  $s$  приводит к увеличению числа точек сигнального созвездия и уменьшению расстояния между точками. Увеличить расстояние между сигнальными точками можно за счет повышения мощности оптического сигнала  $P_{\text{с}}$  в кабеле. Но уже сейчас интенсивность (мощность на единицу площади поперечного сечения сердцевин ОВ) настолько велика, что начинает играть решающую роль чрезвычайно слабая нелинейность материала волокна – кварца: между всеми оптическими каналами ВОСП-СР возникают перекрестные помехи, быстро растущие с увеличением  $P_{\text{с}}$ .

Снижение интенсивности сигнала в волокне достигается за счет увеличения эффективной площади поперечного сечения сердцевин  $A_{\text{эфф}} = 20...50...80...120$  км<sup>2</sup> [17], однако фундаментальное ограничение сверху для увеличения  $A_{\text{эфф}}$  создается необходимостью иметь достаточно малый поперечный размер сердцевин для обеспечения одномодового режима распространения электромагнитных волн по волокну.

**Нелинейный предел Шеннона**

Предел Шеннона показывает величину максимально достижимой скорости передачи  $C = V_{\text{max}}$  дискретного сигнала в непрерывном канале с шириной полосы  $F$  при имеющемся соотношении средних мощностей сигнала  $P_{\text{с}}$  и флуктуационной помехи  $P_{\text{пом}}$ . Типовой линейный тракт ВОСП-СР, фрагмент которого изображен на рис. 5, включает в себя



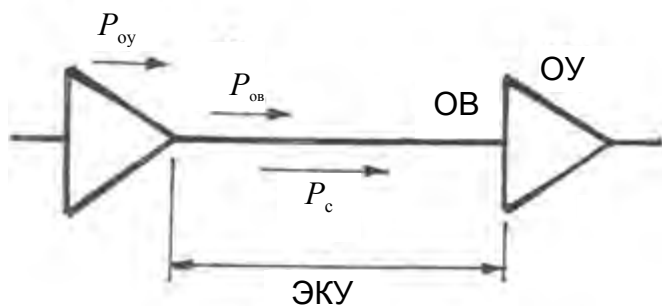


Рис. 5. Фрагмент линейного тракта

оптические волокна на элементарных кабельных участках (ЭКУ) и оптические усилители (ОУ) по концам участков. Обычная длина ЭКУ составляет 80...100 км, усилители – на ОВ, легированном эрбием. Усилители вносят в тракт помеху с мощностью  $P_{oy}$ , а в волокне создается нелинейная помеха  $P_{об}$ . Общая величина помехи  $P_{пом} = P_{oy} + P_{об}$ .

Нелинейный предел Шеннона дает количественную оценку пропускной способности (верхнего предела возможной скорости):

$$C = F \log_2 \left( 1 + \frac{P_c}{P_{oy} + P_{об}} \right), \quad (8)$$

где размерности  $C$  и  $F$  – соответственно бит/с и Гц.

В зависимости от выбранной для оценки полосы частот  $F$  выражение (8) показывает пропускную способность одного оптического канала, всей ВОСП-СР и т.п.

Из (8) можно видеть, что быстро растущая с увеличением  $P_c$  величина  $P_{об}$  в знаменателе (она тем выше, чем больше число спектральных каналов  $m$  в системе передачи) уменьшает величину второго члена в скобках, причем это уменьшение приводит ее к нулевой величине, что дает  $\log_2 1 = 0$  и  $C = 0$ . Закономерность показана на рис. 6.

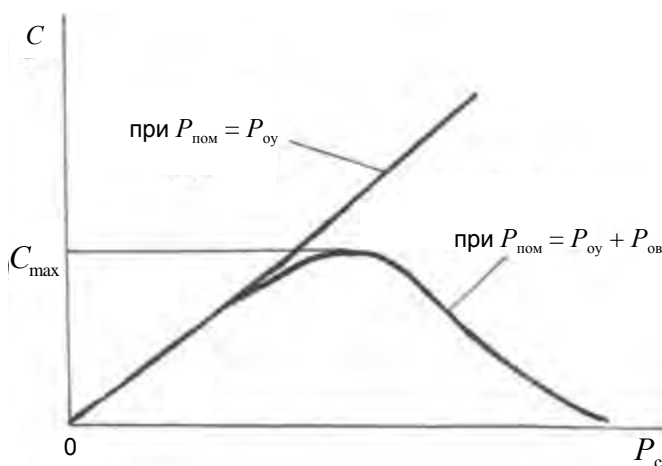


Рис. 6. Нелинейный предел Шеннона

Для современных ВОСП шенноновская (предельная) спектральная эффективность

$$\gamma_{ш} = C_{max}/F = \max\{\log_2(1 + P_c/(P_{oy} + P_{об}))\} \quad (9)$$

составляет 6...10 (бит/с)/Гц на одну поляризацию. Для двухполяризационных форматов модуляции  $\gamma_{ш} = 12...20$  бит/с/Гц.

### Реализуемые и предельные скорости

В завершение проведем оценку возможностей передачи мощных потоков информации по ОВ с применением ВОСП-СР. Удобным инструментом такой оценки является показатель – спектрально-волновая эффективность [18, 19], устанавливающий непосредственную связь между скоростью передачи и шириной используемого диапазона длин волн:

$$\gamma_{\Lambda} = V/\Lambda, \quad (10)$$

где  $\Lambda$  – ширина диапазона длин волн, занимаемого оптическим сигналом в кабеле.

Величина скорости передачи информации

$$V = \gamma_{\Lambda} \Lambda. \quad (11)$$

Соотношение между модификациями эффективности:

$$\gamma_{\Lambda} = \gamma c/\lambda_0^2; \gamma = V/F. \quad (12)$$

Здесь  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с;  $\Lambda/F = \lambda_0^2/c$ ;  $\lambda_0$  – центральная длина волны рассматриваемой полосы.

Значения эффективностей и скоростей передачи (10) – (12) при двухполяризационном мультиплексировании для совмещенного диапазона волн  $C + L$  с шириной  $\Lambda_{CL} = 95$  нм даны в табл. 2.

Величины скоростей в таблице округлены до целых чисел. К реализуемым спектральным эффективностям относятся значения 2...6 бит/с/Гц; предельные эффективности – 12...20 бит/с/Гц; 9 бит/с/Гц приведено как промежуточное значение. Можно видеть, что при эффективности  $\gamma = 2...6$  бит/с/Гц скорости передачи информации по волокну составляют 6...70 Тбит/с, при  $\gamma = 12...20$  бит/с/Гц – 36...240 Тбит/с.

### Заключение

Быстро растущий трафик магистральных линий требует применения оптических кабельных систем передачи со спектральным мультиплексированием, имеющих каналные скорости 100 Гбит/с (100 G) и выше. Этой цели отвечают системы с символьной скоростью, близкой к пределу Найквиста 1 Бод/Гц, символьной эффективностью 2...4 бита на символ и двухполяризационным мультиплексированием. Эффективными форматами модуляциями являются PDM-QPSK и PDM-16QAM. Ограничением для достижения предельных скоростей передачи по Шеннону является нелинейная перекрестная помеха в многоканальных системах передачи по оптическим кабелям.

Таблица 2

### Эффективность и скорость передачи информации по оптическим волокнам

$\gamma$ , бит/с/Гц		2	4	6	9	12	16	20
$\gamma_{\Lambda}$ , Тбит/с/нм		0,25	0,5	0,75	1,125	1,5	2	2,5
$V$ , Тбит/с при $\Lambda =$	$\Lambda_{CL}/4$	6	12	18	27	36	48	60
	$\Lambda_{CL}/2$	12	24	36	53	71	95	120
	$\Lambda_{CL}$	24	48	71	107	143	190	240

Расчет реализуемых и предельных скоростей передачи информации по оптическим кабельным магистралям может быть выполнен с применением выражений (1) – (4), (7), (11) и данных табл. 2. Предельные значения скорости передачи информации по одной паре оптических волокон для оптического диапазона C + L 1530...1625 нм составляют около 150...200 терабит в секунду.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Аджемов А.С.* Телекоммуникации, инфокоммуникации – что дальше? – М.: ИД «Медиа Паблишер», 2011. – 140 с.
2. *Пешков И.Б.* Материалы кабельного производства. – М.: Машиностроение, 2013. – 456 с.
3. *Ларин Ю.Т.* Оптические кабели: методы расчета конструкций. Материалы, Надежность и стойкость к ионизирующему излучению. – М.: Престиж, 2006. – 304 с.
4. *Гордиенко В.Н., Крухмалев В.В., Моченов О.Д., Шарафутдинов Р.М.* Оптические телекоммуникационные системы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2011. – 368 с.
5. *Коршунов В.Н.* Пропускная способность оптического кабеля // Кабели и провода. – 2009. – № 1. – С. 32–35.
6. *Гуркин Н.В., Наний О.Е., Трешиков В.Н., Убайдуллаев Р.Р.* Производительность когерентных систем с канальной скоростью 100 Гбит/с // Вестник связи. – 2013. – № 1. – С. 39–40; 2013. – № 2. – С. 40–42.
7. *Lach E., Idler W.* Modulation formats for 100G and beyond // Optical Fiber Technology. – 2011. – Vol. 17. – P. 377–386.

8. *Winzer P.J.* High – spectral – efficiency optical modulation formats // Journal of Lightwave Technology. – 2012. – Vol. 30, N 24. – P. 3824–3835.
9. *Воронцов А.С., Ларин Ю.Т., Овчинникова И.А., Хвощевская И.В., Шолуденко М.В.* Развитие производства кабелей телекоммуникационного назначения // Кабели и провода. – 2013. – № 3. – С. 3–10.
10. *Гольышко А.В.* Сети будущего и очередной сдвиг парадигмы // Connect. – 2013. – № 10. – С. 76–79.
11. *Парфенов Б.А.* Транспорт уходит в терабиты // Вестник связи. – 2013. – № 4. – С. 24–28.
12. *Ellis A.D., Zhao J., Cotter D.* Approaching the non-linear Shannon limit // J.Lightw.Technol. – 2010. – Vol., 28, N 4. – P. 423–433.
13. *Прокис Дж.* Цифровая связь. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
14. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – М.: ИД «Вильямс», 2007. – 1104 с.
15. *Chandrasekhar S., Liu X.* OFDM based superchannel transmission technology // J.Lightw.Technol. – 2012. – Vol. 30, N 24. – P. 3816–3823.
16. *Downie J.D.* 112 Gb/s PM-QPSK transmission systems with reach lengths enabled by optical fibers with ultra-low loss and very large effective area // Proceedings of SPIE. – 2012. – Vol. 8284. – P. 828403/1 – 828403/12.
17. *Detwiler T.F., Searcy S.M., Stark A.J., Basch B.E., Ralph S.E.* Avoiding fiber nonlinearities by choice of modulation format // Proc. SPIE. – 2011. – Vol. 7960. – P. 796001/1 – 796001/7.
18. *Коршунов В.Н.* Модификации спектральной эффективности ВОСП // Труды конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы» Международного форума информатизации МФИ – 2010. – М.: МТУСИ, 2010. – С. 150–151.
19. *Гордиенко В.Н., Коршунов В.Н.* Спектральная эффективность волоконно-оптической системы передачи // Электросвязь. – 2012. – № 1. – С. 53–56.

**ПОДПИСКА  
В ЛЮБОМ ОТДЕЛЕНИИ СВЯЗИ!**

НА II ПОЛУГОДИЕ 2014 года

*Уважаемые читатели!*

Оформить подписку на журнал «Кабели и провода» очень просто. В любом отделении связи на территории России принимается подписка по каталогу агентств «Роспечать» и «Урал-Пресс». Вам необходимо только вписать Ваши имя, фамилию и адрес доставки в купон, вырезать его и оплатить подписку по цене, указанной в этом каталоге.

Министерство связи РФ																	
<b>АБОНЕМЕНТ</b> на газету журнал										79943							
Кабели и провода										(индекс издания)							
(наименование издания)										Количество комплектов:							
на 2014 год по месяцам																	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12						
Куда						(почтовый индекс)						(адрес)					
Кому																	
(фамилия, инициалы)																	
-----																	
ДОСТАВОЧНАЯ КАРТОЧКА																	
на газету журнал										79943							
Кабели и провода										(индекс издания)							
(наименование издания)										Количество комплектов:							
Стоимость	подписки		руб.		Количество комплектов:		руб.		руб.		руб.						
на 2014 год по месяцам																	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12						
Куда						(почтовый индекс)						(адрес)					
Кому																	
(фамилия, инициалы)																	

ПОДПИСКА ПО КАТАЛОГАМ «РОСПЕЧАТЬ» И «УРАЛ-ПРЕСС»