

УДК 621.372.8

СПЕКТРАЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ

В.Н. Гордиенко, зав. кафедрой МЭС МТУСИ, д.т.н.; mes@mtuci.ru

В.Н. Коршунов, профессор кафедры МЭС МТУСИ, д.т.н.

Ключевые слова: волоконно-оптическая система передачи (ВОСП), спектральная эффективность, предел Шеннона, эффективность по Шеннону, спектрально-волновая эффективность.

Введение. Как известно [1], современные телекоммуникации динамично и сбалансированно развиваются на основе конкурентного рынка. Сектор электросвязи рынка телекоммуникаций имеет в качестве основного продукта транспортировку сигналов, причем к одному из определяющих факторов конкурентоспособности реализаций данного продукта относится *эффективность передачи информации*. Совершенствование транспортных функций современных телекоммуникационных систем [2] осуществляется при неизменном повышении их эффективности, что особенно заметно выражается в прогрессе базовой разновидности средств телекоммуникационного транспорта – ВОСП.

Определение путей повышения эффективности ВОСП – необходимый элемент исследовательской деятельности в области телекоммуникаций. Ниже рассматриваются предельные возможности реализации высокой эффективности ВОСП.

Показатели эффективности. С позиций теории систем [3, 4] упорядоченная совокупность параметров ВОСП может быть представлена n -мерным вектором $\mathbf{q}=(q_1 \dots q_n)$. Аналогично определяются векторы внешних условий функционирования системы \mathbf{s} , неуправляемых факторов \mathbf{v} и управляемых факторов \mathbf{x} . Совокупность всех векторов \mathbf{x} образует множество возможных решений $\mathbf{X}=\{\mathbf{x}\}$ технической задачи обеспечения эффективности ВОСП. Применительно к обеспечению эффективности ВОСП формируется совокупность показателей (критериев) качества – целевых функций $f_1(x) \dots f_m(x)$, характеризующих параметры системы. Каждому решению $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$ соответствует оценка y – результат операции обеспечения эффективности в виде целевой векторной функции

$$y(x) = (f_1(x) \dots f_m(x)). \quad (1)$$

Соответствие между реальным или прогнозируемым результатом операции $y(x)$ и ее требуемым результатом $y_{\text{тр}}$ выражается показателем эффективности ВОСП:

$$W(x) = r(y(x), y_{\text{тр}}) | \mathbf{x} \in \mathbf{X}, \quad (2)$$

где r – функция соответствия.

В зависимости от содержания конкретных задач и практических возможностей их решения выбирается вид показателя эффективности в соответствии с концепцией рационального поведения: пригодностью, оптимизацией и адаптивизацией. К распространенным на практике показателям эффективности относится показатель W [5], характеризующий нормированный к затратам ресурсов D результат G :

$$W = G / D. \quad (3)$$

В принципе этот показатель может определяться как $W=G-D$, а в самом общем виде $W=\varphi(G, D)$.

По такой модели построены различные показатели эффективности передачи информации: информационная эффективность $\eta=V/C$, энергетическая эффективность $\beta=V/q_0$ и частотная эффективность (в ВОСП – спектральная эффективность), определяемая соотношением

$$\gamma=V/F, \quad (4)$$

где V – скорость передачи цифрового сигнала; F – ширина полосы частот в линии; q_0 – отношение мощности сигнала к спектральной мощности помехи;

$$C = \max V \quad (5)$$

– пропускная способность тракта передачи. Для ВОСП наиболее приемлем показателем (4), для которого $y(x)=\gamma$; $G=V$; $D=F$.

Задача повышения спектральной эффективности ВОСП решается, как правило, в концепции адаптивизации: последовательно совершенствуется построение системы и, как следствие, улучшаются параметры ее элементов.

При некотором выделенном для передачи сигнала спектральном ресурсе F оптического тракта ВОСП показатель γ находится в зависимости от скорости передачи информации, которая, в свою очередь, участвует в формировании таких экономических показателей, как цена передачи одного бита информации, стоимость предоставления пользователю единицы скорости передачи информации, стоимость канала-километра связи и др. К этим показателям, в частности, относятся удельные капитальные вложения [6] при строительстве линии связи:

$$K_{\text{уд}} = K / \Pi M_{\text{вв}}, \quad (6)$$

где K – сумма капитальных вложений; $\Pi M_{\text{вв}}$ – вводимая в действие производственная мощность.

При этом величины K и $\Pi M_{\text{вв}}$ связаны с числом N каналов в линии: $K \sim \sqrt{N}$, а $\Pi M_{\text{вв}} \sim N$. Принимая во внимание соответствие $V \sim N$, имеем $K_{\text{уд}} \sim 1/\sqrt{N} \sim 1/\sqrt{V}$ и, согласно (4) и (5):

$$K_{\text{уд}} \sim 1/\sqrt{\gamma}. \quad (7)$$

Соотношение (7) показывает, что экономическая целесообразность применения ВОСП тем выше, чем большее значение имеет реализуемая в ней скорость передачи информации и спектральная эффективность.

Предел Шеннона. Максимально возможная скорость передачи информации в оптическом тракте ВОСП определяется формулой Шеннона:

$$C = F \log_2(1 + (P_c / P_{\text{пом}})), \quad (8)$$

где P_c и $P_{\text{пом}}$ – средние мощности сигнала и аддитивной помехи, имеющей нормальное распределение и равномерный спектр, условно называемой аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ). При спектральной плотности шума N_0 средняя мощность помехи $P_{\text{пом}} = N_0 F$. В свою очередь, $P_c = C E_{\text{бит}}$, где $E_{\text{бит}}$ – средняя энергия при передаче единицы информации. Согласно теоремам кодирования Шеннона, при соот-

ветствующем кодировании передаваемого сигнала скорость V может быть как угодно близка к пропускной способности C при сколь угодно малой вероятности ошибки на приеме.

В соответствии с (4), (5) и (8) спектральная эффективность

$$\gamma_{ш} = \log_2(1 + (P_c / P_{пом})). \tag{9}$$

На рис. 1 представлены частотные параметры ВОСП со спектральным разделением (ВОСП-СР) оптических каналов для передаваемых импульсов со спектром вида корень-квадратичного приподнятого косинуса [8]. На рисунке: F_1 – каналный промежуток (шаг частотной сетки) ВОСП-СР; F_2 – спектральный диапазон сигнала в оптическом канале; $F_3=1/T$ – эффективная ширина спектра оптического сигнала (T – длительность символа); F_4 – защитный промежуток между каналами (обычно $F_4 \approx 0,2 F_1$). В соответствии с приведенными обозначениями, эффективность наряду с (9) рассматривается в следующих выражениях:

$$\gamma_{ш} = (F_2 / F_1) \log_2 \left(1 + \left(\frac{P_c}{N_0 F_2} \right) \right); \tag{10}$$

$$\gamma_{ш} = (F_3 / F_1) \log_2 \left(1 + \left(\frac{P_c}{N_0 F_3} \right) \right). \tag{11}$$

В одноканальных ВОСП без оптических усилителей (ОУ) $P_{пом}$ определяется шумами фотоприемника; при наличии ОУ преобладают шумы усиленной спонтанной эмиссии (amplified spontaneous emission – ASE). В ВОСП-СР при большом числе оптических каналов проявляется нелинейность оптического волокна и на первый план выходит мультипликативная перекрестная помеха между каналами, возникающая в результате фазовой кросс-модуляции (ФКМ). В условиях существенной нелинейности оптического тракта ВОСП-СР эффективность, определяемая «нелинейным» пределом Шеннона [8], составляет для когерентного детектирования:

$$\gamma_{ш}^H \geq \log_2 \left(1 + \frac{P_c e^{-\left(\frac{P_c}{I_{ФКМ}}\right)^2}}{P_{пом} + \left(1 - e^{-\left(\frac{P_c}{I_{ФКМ}}\right)^2}\right) P_c} \right); \tag{12}$$

для прямого детектирования:

$$\gamma_{ш}^H \approx \frac{1}{2} \log_2 \left(\frac{P_c e^{-\left(\frac{P_c}{I_{ФКМ}}\right)^2}}{P_{пом} + \left(1 - e^{-\left(\frac{P_c}{I_{ФКМ}}\right)^2}\right) P_c} \right) - 1, \tag{13}$$

где $I_{ФКМ}$ – интенсивность перекрестной помехи; $P_{пом}$ – мощность шума ASE. Можно видеть, что второй член знаменателя с ростом $I_{ФКМ}$ увеличивается, снижая тем самым спектральную эффективность.

На рис. 2 проиллюстрирован феномен нелинейного предела Шеннона; приводится спектральная эффективность в расчете на одну поляризацию в зависимости от мощности совокупного оптического сигнала. Полоса частот оптического тракта ВОСП-СР в данном примере составляет 10 ТГц и уплотняется оптическими каналами шириной от 1 ГГц до 5 ТГц (при 10 ТГц имеет место одноканальная ВОСП). Можно видеть, что с ростом мощности сигнала возникает тенден-

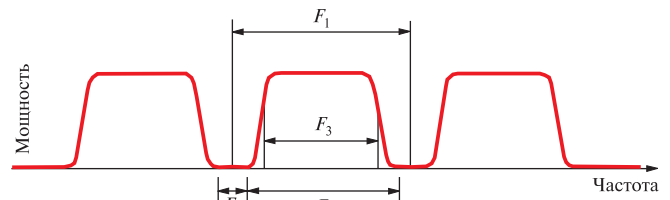


Рис. 1

ция уменьшения спектральной эффективности, проявляющаяся тем сильнее, чем больше число каналов ВОСП-СР. Одноканальная ВОСП спада спектральной эффективности не имеет.

Численные значения эффективности ВОСП по Шеннону.

Общий подход к расчету предельной спектральной эффективности и пропускной способности ВОСП строится на определении необходимого соотношения $P_c/P_{пом}$ для заданного коэффициента ошибок $K_{ош} = BER$ при конкретных способах передачи сигналов и основополагающих принципах построения системы. В [8, 9] подробно изложены результаты исследований в данной области. Ниже приводится пример расчета эффективности ВОСП по Шеннону.

Рассмотрим систему с одним оптическим каналом, двухуровневой модуляцией интенсивности формата NRZ и прямым детектированием. Линейный тракт системы содержит элементарные кабельные участки и регенераторы с преобразованием оптического сигнала в электрический и обратно. В приемном устройстве регенератора оптический сигнал преобразуется в электрический, усиливается, фильтруется, в частности ограничивается сверху по спектру, поступает в точку решения регенератора (ТРР). В схеме сигнал идентифицируется на наличие информационных символов 1 или 0 на основании сравнения принятого сигнала в момент принятия решения с установленным порогом $U_{пор}$.

Особенность расчета $P_c/P_{пом}$ состоит в том, что соотношение сигнал/помеха следует определять не для средней мощности помехи в регенераторе, пересчитанной из электрического тракта в оптический, а для средней мощности сигнала, действующего в электрическом тракте (здесь текущая мощность пропорциональна квадрату оптической текущей мощности, так как мгновенные значения $u_{эл} \sim p_{опт}$). Это условие должно быть выполнено, поскольку в электрическом тракте помеха регенератора может быть квалифицирована как АБГШ, но будучи пересчитана в оптический тракт теряет гауссово распределение. Указанное отношение сигнал/помеха принадлежит к каналу передачи информации в пре-

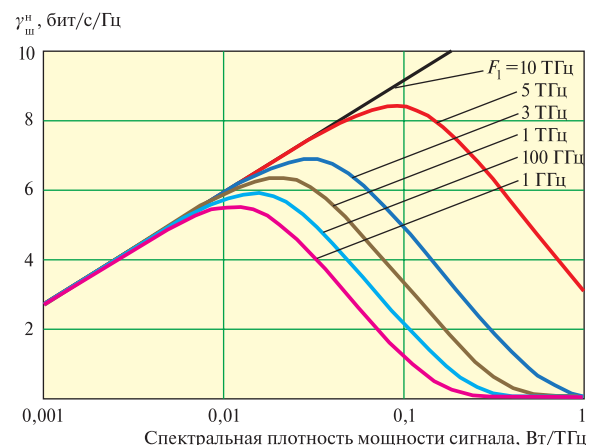


Рис. 2

делах оптического тракта ВОСП. Рассматриваемый пример расчета [9, 10] удовлетворяет условиям теорем кодирования Шеннона. Нетрудно получить

$$P_c / P_{\text{пом}} = 1,5x_{\text{ош}}^2 | p_{\text{ош}} \in [10^{-6}, 10^{-12}], \quad (14)$$

где $x_{\text{ош}} = U_{\text{пор}} / U_{\text{пом}}$ – предел интеграла вероятностей; $U_{\text{пом}}$ – эффективное напряжение помехи в ТРР.

При выборе формулы спектральной эффективности (9)–(13) примем во внимание отсутствие перекрестной помехи, а также то, что если ставится задача отыскания теоретического предела скорости передачи информации, то следует положить $F_2, F_3 \rightarrow F_1$, а $F_4 \rightarrow 0$. На этом основании для расчета $\gamma_{\text{ш}}$ используется выражение (9). Итак, задаемся значениями коэффициента ошибок реальных ВОСП $K_{\text{ош}}$, равного $p_{\text{ош}}$ при длительном наблюдении. Для него находим по интегралу вероятностей $x_{\text{ош}}$, из (14) получаем $P_c / P_{\text{пом}}$ и по (9) рассчитываем предельную спектральную эффективность ВОСП. Результаты расчета представлены в табл. 1.

Заметим, что $K_{\text{ош}}$ в табл. 1 представляет не реализуемую при соответствующей $\gamma_{\text{ш}}$ вероятность ошибки, а значение отношения $P_c / P_{\text{пом}}$, имеющее место при такой вероятности ошибки в ВОСП рассматриваемого вида. Как указано выше, собственно вероятность ошибки может быть доведена до сколь угодно малого значения.

По данным табл. 1 для типовых значений $K_{\text{ош}} \in [10^{-8}, 10^{-12}]$ имеем $\gamma_{\text{ш}} = 5,59\text{--}6,24$. Числа имеют малую вариацию в результате логарифмирования отношения сигнал/помеха (9). Поэтому выбор оценочной эффективности в данном диапазоне аргумента не критичен. В качестве такой величины можно взять значение спектральной эффективности для средней точки интервала $K_{\text{ош}} = 10^{-10}$ с округлением до ближайшего целого. В итоге получаем $\gamma_{\text{ш}} = 6$ бит/с/Гц.

В [9] приводятся значения предельной спектральной эффективности 6–8 бит/с/Гц на поляризацию для диапазона длин волн 1550 нм, в дальнейшем на волнах диапазона 1900 нм можно ожидать эффективности выше 10 бит/с/Гц на поляризацию. В настоящее время реализуемые значения $\gamma_{\text{ш}}$ составляют 1–2 бит/с/Гц на поляризацию. Для примера приведем данные публикаций [11] и [12]: 4 и 2 бит/с/Гц при двухполяризационной модуляции.

В табл. 2 представлены значения пропускной способности стандартизованных диапазонов оптического спектра (на поляризацию) $C = \gamma_{\text{ш}} F$, рассчитанные для $\gamma_{\text{ш}} = 6$ бит/с/Гц.

Как видно из таблицы, диапазон С имеет пропускную способность 26 Тбит/с по Шеннону, а для объединенного спектрального диапазона С+L пропускная способность составляет 26+43=69 Тбит/с.

Спектрально-волновая эффективность. В работе исследовался один из показателей ВОСП – спектральная эффективность (4), имеющая в теории передачи дискретных сообщений более конкретный термин – частотная эффективность. Рассмотрим модификацию понятия спектр (совокупность всех значений какой-либо величины, характеризующей систему или процесс) для области передачи электромагнитных сигналов: спектр амплитуд, фаз, частот и длин волн. Последняя разновидность широко используется в оптической связи, поэтому практический интерес представляет модификация спектральной эффективности ВОСП – спектрально-волновая эффективность γ_{Λ} , учитывающая ширину используемого диапазона длин волн Λ :

$$\gamma_{\Lambda} = V / \Lambda. \quad (15)$$

В данном случае в выражении (3) имеем $D = \Lambda$. При всей однозначности определения γ_{Λ} (15) применение спектраль-

Таблица 1

$K_{\text{ош}}$	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}
$\gamma_{\text{ш}}$, бит/с/Гц	5,59	5,78	5,95	6,10	6,24

но-волновой эффективности может сопровождаться неудобством, вызванным зависимостью соотношения F и Λ от местоположения на абсолютных шкалах частот и длин волн. Поэтому ниже покажем, как связаны параметры γ и γ_{Λ} .

Спектральный диапазон, используемый для передачи оптического сигнала, ограничен снизу и сверху частотами $f_{\text{н}}, f_{\text{в}}$ и длинами волн $\lambda_{\text{н}}, \lambda_{\text{в}}$ с центральными значениями f_0 и λ_0 :

$$\left. \begin{aligned} F &= f_{\text{в}} - f_{\text{н}}; \quad \Lambda = \lambda_{\text{в}} - \lambda_{\text{н}}; \\ f_{\text{н}} &= c / \lambda_{\text{в}}; \quad f_{\text{в}} = c / \lambda_{\text{н}}; \quad c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}; \\ f_0 &= (f_{\text{н}} + f_{\text{в}}) / 2; \quad \lambda_0 = (\lambda_{\text{н}} + \lambda_{\text{в}}) / 2. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Из (16) следует:

$$F / \Lambda = \frac{1}{c} \left(f_0^2 - \frac{F^2}{4} \right); \quad \Lambda / F = \frac{1}{c} \left(\lambda_0^2 - \frac{\Lambda^2}{4} \right). \quad (17)$$

Согласно (4), (15) и (17), связь между частотной и волновой модификациями спектральной эффективности:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{\Lambda} &= \gamma c / \left(\lambda_0^2 - \frac{\Lambda^2}{4} \right); \\ \gamma &= \gamma_{\Lambda} c / \left(f_0^2 - \frac{F^2}{4} \right). \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

При $F \ll f_0$ и $\Lambda \ll \lambda_0$ формулы связи эффективностей:

$$\gamma_{\Lambda} = \gamma c / \lambda_0^2; \quad \gamma = \gamma_{\Lambda} c / f_0^2; \quad (19)$$

$$F / \Lambda = f_0^2 / c; \quad \Lambda / F = \lambda_0^2 / c. \quad (20)$$

Члены $\Lambda^2/4$ и $F^2/4$ в (18) показывают ошибку при расчетах по (19) и (20).

В качестве примера определим спектрально-волновую эффективность по Шеннону для диапазона волн 1550 нм. По (20) находим $F/\Lambda = 1,25 \cdot 10^{20}$ Гц/м = 125 ГГц/нм, что соответствует известным соотношениям канальных промежутков ВОСП-СР: 25 ГГц – 0,2 нм; 50 ГГц – 0,4 нм и т.д. При частотной модификации спектральной эффективности ВОСП $\gamma_{\text{ш}} = 6$ бит/с/Гц по (18) и (19) получаем волновую модификацию $\gamma_{\text{ш}\Lambda} = 7,5 \cdot 10^{20}$ бит/с/м = 0,75 Тбит/с/нм.

Заключение. Стоимость связи с применением ВОСП находится в обратной зависимости от спектральной эффективности, характеризующей продуктивность использования частотного ресурса среды распространения сигналов. Верхний теоретический предел спектральной эффективности ВОСП может быть определен с помощью модификаций (9)–(13) формулы Шеннона (8). При реализуемых сегодня параметрах ВОСП эффективность по Шеннону $\gamma_{\text{ш}} = 6\text{--}8$ бит/с/Гц на поляризацию. При дальнейшем совершенствовании сис-

Таблица 2

Диапазон	Границы, нм	Ширина, ТГц	С, Тбит/с
0	1260–1360	17,5	105
E	1360–1460	15,1	91
S	1460–1530	9,4	56
C	1530–1565	4,4	26
L	1565–1625	7,1	43
U	1625–1675	5,5	33
0...U	1260–1675	59,0	354

тем можно ожидать $\gamma_{\text{ш}} > 10$ бит/с/Гц, в таком случае реальная эффективность ВОСП-СР достигнет 1–2 бит/с/Гц на поляризации.

Определенными достоинствами обладает параметр γ_{λ} – спектрально-волновая эффективность: скорость передачи информации, нормированная к единице длины волны (15). В диапазоне длин волн 1550 нм при $\gamma_{\text{ш}} = 6$ бит/с/Гц спектрально-волновая эффективность ВОСП $\gamma_{\lambda} = 0,75$ Тбит/с/нм.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Мардер Н.С.** Современные телекоммуникации. – М.: ИРИАС, 2006.
2. Основы построения телекоммуникационных систем и сетей/ Под ред. **В.Н. Гордиенко** и **В.В. Крехмалева**. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008.
3. Надежность и эффективность в технике/ Справочник в 10 т. – Т.3. Эффективность технических систем. – М.: Машиностроение, 1988.
4. **Коршунов В.Н.** Методы решения задач оценки и повышения эффективности оптических кабелей связи//Электросвязь. – 1992. – №2. – С.27–30.
5. **Дружинин В.В., Конторов Д.С.** Системотехника. – М.: Радио и связь, 1985.
6. **Голубицкая Е.А.** Экономика связи. – М.: ИРИАС, 2006.
7. **Essiambre R.-J., Kramer G., Winzer P.J et al.** Capacity limits of optical fiber networks// Journal of Lightwave Technology. – 2010. – V.28, №4. – P.662–701.
8. **Ellis A.D., Zhao J., Cotter D.** Approaching the non-linear Shannon limit// Journal of Lightwave Technology. – 2010. – V.28, №4. – P.423–433.
9. **Коршунов В.Н.** Оценка спектральной эффективности волоконно-оптической системы передачи// Тр. конф. “Телекоммуникационные и вычислительные системы” Международного форума информатизации МФИ-2008. – М.: МТУСИ, 2008. – С.140–141.
10. **Коршунов В.Н.** Пропускная способность оптического кабеля// Кабели и провода. – 2009. – № 1. – С.32–35.
11. **Kukuchi K.** Ultra-long-haul optical transmission characteristics of wavelength-division multiplexed dual-polarization 16-quadrature-amplitude-modulation signals// Electronics Letters. – 2010. –V.46, №6. – P.433–444.
12. **Takiguchi K., Oguma M., Takahashi H., Mori A.** Integrated-optics-eight-channel OFDM demultiplexer with 160 Gbit/s signal reception// Electronics Letters. – 2010. – V.46, №8. – P. 575–576.

Получено 28.07.11