

---

УДК 621.391.6

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБРИДНОЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ

**Р.Ф. Бикметов**, аспирант СибГУТИ; rav-bikmetov@ngs.ru

**К.Е. Заславский**, профессор СибГУТИ, к.т.н.

---

***Ключевые слова:** оптические системы передачи со спектральным и временным уплотнением, линейный тракт, ширина полосы, спектральный канал.*

**Введение.** За последние годы в отрасли телекоммуникаций значительно возросла потребность в высокоскоростных широкополосных системах передачи. Сегодня среди волоконно-оптических систем передачи (ВОСП), удовлетворяющих высоким требованиям к широкополосности и пропускной способности, наибольшее распространение получили ВОСП со спектральным разделением каналов (DWDM). Однако они, как и любые другие системы, имеют ряд недостатков. Это – высокая мощность сигнала на выходе передатчика, что может вызывать нелинейные явления в оптическом волокне (ОВ), наличие большого числа оптических фильтров и необходимость включения регенератора в каждый канал. Кроме того, компенсатор дисперсии, включенный в линейный тракт, точно компенсирует дисперсию только на одной длине волны, что обуславливает необходимость компенсации остаточной дисперсии в каждом канале. Перечисленные недостатки резко ухудшают технико-экономические пока-

затели данных систем. Следовательно, одной из ключевых технологических проблем является реализация оптической технологии высокоскоростной передачи данных с лучшими технико-экономическими показателями. Для решения данной проблемы было исследовано несколько методов, один из которых применение гибридных ВОСП с временным и волновым разделением каналов (OTDM-DWDM). В статье рассматривается гибридная ВОСП, в которой реализуются преимущества как DWDM, так и OTDM.

Как известно, основные преимущества OTDM – наличие только одного регенератора на все каналы, а также использование значительно меньшего количества полосовых фильтров в тракте приема при выделении цифровых каналов, что может привести к существенному улучшению технико-экономических показателей данных систем при их внедрении. Реализации метода OTDM во многом способствует развитие волоконно-оптических технологий и создание высокоскоростных цифровых микросхем.

Главное преимущество систем DWDM – возможность организации большого числа каналов в широком спектре длин волн.

**Предлагаемая структурная схема гибридной ВОСП.** Структурная схема рассматриваемой системы передачи представлена на рис. 1. Она состоит из передатчика, где для формирования групп из  $N$  каналов используются системы OTDM<sub>1</sub> ... OTDM<sub>N</sub>, линейного тракта (ЛТ), в котором организуются спектральные каналы, и приемника.

Структура отдельно взятой системы OTDM показана на рис. 2. В качестве источника излучения для каждой группы каналов на передаче используется узкополосный лазер (УЛ), генерирующий периодическую импульсную последовательность с частотой следования 1 ТГц и работающий на несущей длине волны, соответствующей данной группе каналов [1]. Также лазер должен выдавать импульсы такой длительности, чтобы выполнялось условие  $T_B < (NB)^{-1}$ , где  $B$  – скорость передачи в канале. Усилитель (BOA), включенный на выходе УЛ, используется для компенсации потерь в направленном ответвителе (НО) и характеризуется небольшим коэффициентом усиления:  $g = a_{НО} = 10 \lg N_{ВЫХ} = 10$  дБ (где  $N_{ВЫХ}$  – количество выходов НО), поэтому на его выходе мощность шума за счет спонтанного излучения сравнительно мала ( $P_{ASE} < 0,3$  мкВт). В качестве НО используется волноводный маршрутизатор, состоящий из двух звездных соединителей ( $N \cdot M$ ), где  $N=10$ , и волноводной решетки, образованной  $M$  волноводами [1]. Эта реализация НО является полностью пассивной, что можно считать ее основным достоинством.

Оптические модуляторы (ОМ), представляющие собой интерферометр Маха-Зендера [6], работают по принципу электрооптической модуляции. Сигнал цикловой синхронизации (СЦС или маркер) передается путем модуляции непрерывной последовательности оптических импульсов со скоростью 100 Гбит/с, в то время как информационные сигналы  $c_1(t) \dots c_N(t)$  подаются на модулятор со скоростью 1 Тбит/с. Цифровой мультиплексор (MUX) состоит из линий задержки, выполненных на ОВ соответствующей длины, и звездного соединителя, реализованного на волоконной сплавной конической структуре. Время задержки для  $i$ -го канала определяется соотношением:  $\tau_3 = iT_B$ . Сигнал цикловой синхронизации передается без задержки путем модуляции периодической последовательностью импульсов, скорость следования которой (100 Гбит/с) определяется длительностью цикла передачи OTDM (10 пс).

Исследуемый тракт (рис. 1) представляет собой регенерационную секцию, состоящую из  $n$  усилителей и  $n+1$  пролетов одномодового оптического кабеля длиной  $l_{пр}$  каждый. Данная секция образована между выходом передающего терминала и входом полностью оптического линейного 3R-регенератора (РЛ), расположенного на входе приемной части. В качестве линейных усилителей используются волоконные усилители, легированные эрбием (EDFA), широко применяемые в системах WDM.

В регенерационном пункте (РП) для каждого канала используется свой 3R-регенератор, выполняющий восстановление сигнала на своей длине волны. Структурная схема отдельно взятого регенератора подробно описана в [2, 3] и представлена на рис. 3.

Структурная схема отдельно взятой системы OTDM на приеме изображена на рис. 4. Приемник начинается с полностью оптического 3R-регенератора, принцип действия которого аналогичен регенераторам, используемым в линейном тракте. После этого из восстановленного сигнала выделяется сигнал цикловой синхронизации (СЦС), который, в свою очередь, управляет работой оптических ключей, входящих в состав цифровых демультиплексоров систем OTDM в каждом канале. Волновой демультиплексор (DMT) реализован

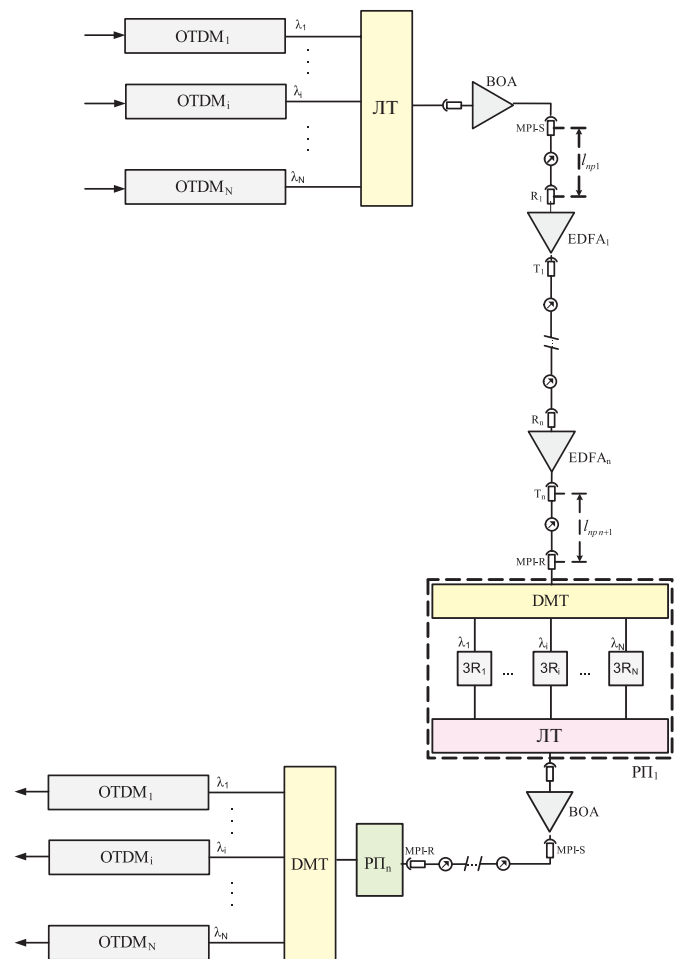


Рис. 1. Структурная схема гибридной ВОСП

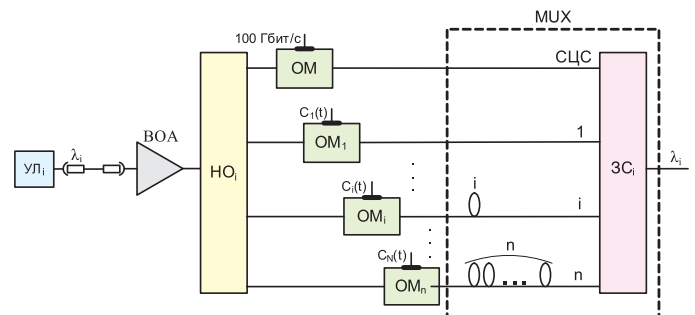


Рис. 2. Структурная схема отдельной системы OTDM на передаче

на волноводной решетке. Он содержит  $2NM$  ( $N$  – количество выходных портов первого из них,  $M$  – количество выходных портов второго) звездных соединителя, связанных между собой волноводной решеткой из  $M$  волноводов. Данная решетка разделяет каналы в зависимости от длины волны [6].

В качестве цифрового демультиплексора (DMUX) (рис. 4) используется пассивный волноводный мультиплексор на  $n$  спектральных каналах. Он представляет собой направленный ответвитель, являющийся волноводным маршрутизатором (аналогично используемому на приеме), и группу оптических ключей. Они приводятся в действие выделенным сигналом СЦС, который подается на них через НО и линии задержки.

**Расчет спектра гибридной системы.** Так как оптические импульсы, излучаемые лазером на передаче, являются гауссовыми, то амплитуда напряженности электрического поля изменяется во времени по закону [5]:

$$A = A_0 \exp\left(-\frac{t^2}{2T_0^2}\right),$$

где  $A_0$  – максимальное значение напряженности поля,  $T_0$  – длительность половины импульса на уровне  $1/e^{1/2}$ .

При переходе к мощности излучаемых импульсов получим

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{t^2}{T_0^2}\right). \tag{1}$$

Полная длительность импульса  $\tau_n$  определяется по уровню 0,01 ( $P_{0,01}$ ) от максимального значения его мощности  $P_0$  [5]. В исследуемой OTDM-системе используется код с возвращением к нулю на тактовом интервале  $T_b$ , поэтому  $\tau_n = 0,5T_b$ , где  $T_b = 1/B$ ,  $B$  (Гбит/с) – скорость передачи информации в канале. Тогда из (1) определяем

$$T_0 = \frac{T_{0,01}}{\sqrt{\ln 0,01}} \approx 0,23 \text{ пс.}$$

При отсутствии частотной модуляции импульс – спектрально-ограниченный и выполняется соотношение [5]:  $\Delta\omega T_0 = 1$ . Отсюда полуширина спектра импульса по уровню 0,01, выраженная в циклической частоте,  $\omega_{0,01} = 4,35 \cdot 10^{12}$  (рад/с). Это соответствует ширине полосы на передаче  $\Delta f = 1,38$  ТГц. Ширина полосы канального сигнала, выраженная в спектре длин волн,

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta f \lambda_0^2}{c} = 11,1 \text{ нм,}$$

где  $\lambda_0 = 1,55$  мкм,  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

Далее произведем расчет частотного плана гибридной ВОСП с тремя спектральными каналами. В качестве рабочего диапазона примем диапазон (1530–1565) нм в соответствии с [4]. Результаты расчета приведены в табл. 1. Спектральная диаграмма гибридной ВОСП с тремя спектральными каналами изображена на рис. 5. Следует отметить, что в соответствии с [5] частотное разнесение между ними составляет 100 ГГц (0,8 нм), а ширина полосы канала, определенная выше, равна 1,38 ТГц.

**Расчет линейного тракта гибридной системы передачи.** Для примера рассмотрим гибридную ВОСП на три волновых канала. Исходя из требуемого отношения сигнал/помеха (OSNR), определим максимальное число усилителей и пролетов в регенерационной секции 30-канальной гибридной системы передачи, работающей со скоростью 100 Гбит/с. Для объединения в группы по 10 каналов (1–10, 11–20, 21–30) используется полностью оптическое временное мультиплексирование, после чего происходит их дальнейшее объединение по соответствующей длине волн.

Цель расчета – определение числа усилителей в регенерационной секции. Предполагая, что каждый усилитель точно компенсирует потери в прилегающем к нему пролете, имеем [6]:

$$10^{0,1a_i} = G_i; \quad OSNR = p_s - 10 \lg \sum_{i=1}^n G_i - N_f - A, \tag{2}$$

где  $p_s$  – уровень средней оптической мощности в одном канале,  $G_i$  – коэффициенты усиления усилителей (в раз),  $A = 10 \lg(hf\Delta f_{ch}/1 \text{ мВт})$ ,  $f$  – частота оптической несущей,  $h$  – постоянная Планка,  $\Delta f$  – спектр модулированного сигнала, практически  $\Delta f = 2B$ , где  $B$  (бит/с) – информационная скорость передачи в канале,  $N_f$  – коэффициент шума EDFA. Если потери во всех пролетах одинаковы, то из (2) найдем число усилителей в секции регенерации:

$$n = 10^{0,1(p_s - OSNR - g - N_f - A)}. \tag{3}$$

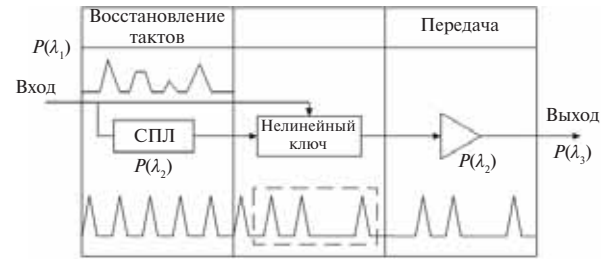


Рис. 3. Структурная схема отдельного регенератора

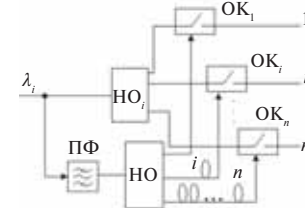


Рис. 4. Структурная схема отдельной системы OTDM на приеме

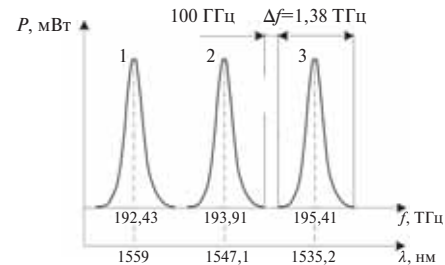


Рис. 5. Спектральная диаграмма восьмиканальной гибридной ВОСП

Заметим, что коэффициент усиления  $g$  (дБ) точно компенсирует потери в пролете и компенсаторе дисперсии (КД):  $g = a_i = a_{пр} + a_{кд}$ , где затухание пролета определяется выражением:  $a_{пр} = a_k \cdot l_{пр}$ . Согласно статистике, изложенной в [4], для рассматриваемого рабочего диапазона коэффициент затухания в кабеле оценивается, как  $a_k = (0,207 + 0,003)$  дБ/км. Тогда для “худшего” случая имеем:  $a_k = 0,21 \cdot l_{пр}$ . Потери в КД зависят от его схемной реализации. Если КД выполнен на DCF [6], то

$$a_{кд} = a_{кд} \cdot l_{кд}. \tag{4}$$

Таблица 1

№ канала	Несущая частота, ТГц	Несущая длина волны, нм	Граничные частоты, ТГц (длины волн, нм)	Ширина полосы канала
1	192,43	1559	191,74–193,12 (1553,45–1564,55)	1,38 ТГц (11,1 нм)
2	193,91	1547,1	193,22– 94,6 (1541,55–1552,65)	
3	195,41	1535,2	194,72–196,1 (1529,65–1540,75)	

Таблица 2

Длина пролета, км	SMF	0,3
	NZDSF	1,5
Допустимая хроматическая дисперсия, пс/нм	6	

Сомножители в (4) – потери и длина КД, соответственно. Если КД реализован на волоконной брегговской решетке (ВБР), то потери в таком КД составляют порядка 6 дБ [4, 7]. Поскольку спектр источника излучения узкий (менее 0,1 нм), то для этого случая в [4] приводится соотношение:

$$Dl_{\text{пр}} = \pi \varepsilon c q / \lambda^2 B^2, \quad (5)$$

где  $q=1/Q$ ,  $Q$  – скважность импульсов,  $c$  – скорость света,  $\lambda$  – длина волны излучения,  $D$  – коэффициент дисперсии в пс/(нм·км),  $\varepsilon$  – ухудшение OSNR из-за случайного расширения импульсов (термин, приведенный в [4]):

$$\varepsilon = \left( \left( 10^{\frac{p_x}{5}} - 1 \right) / 2\pi \right)^{0,5}, \quad (6)$$

где  $p_x=0,5, 1$  или  $2$  дБ. Соответственно,  $\varepsilon=0,2; 0,3; 0,49$ .

Теперь из (5) для SMF – NZDSF = 20 пс/(нм·км) и  $D_{\text{NZDSF}} - D_{\text{SMF}} = 4$  пс/(нм·км), как для «худшего» случая в выбранном диапазоне, найдем длины пролетов без компенсации дисперсии и соответствующую допустимую хроматическую дисперсию при  $p_x = 1$  дБ ( $\varepsilon=0,3$ ),  $\lambda = 1,55$  мкм для кода RZ и скорости передачи в канале 100 Гбит/с. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Приступая к расчету числа усилителей  $n$  из соотношения (3), замечаем, что оно зависит от уровня средней мощности в интерфейсе MPIS  $p_s$ , (т.е. на входе ЛТ) и от величины OSNR на выходе усилителя. Величина  $p_s$  ограничена сверху нелинейными помехами, возникающими в ОБ, а снизу – помехами спонтанного излучения, возникающими в оптических усилителях. Выбор оптимального уровня  $p_s$  может быть темой отдельного исследования, здесь же на основе данных, приведенных в [6], примем величину  $p_s = (3; 5; 7)$  дБ. Величина OSNR=12,5 дБ, что соответствует норме, приведенной в [4] для  $B = 100$  Гбит/с при использовании упреждающего кодирования (FEC).

Приведем пример расчета числа усилителей для этой скорости передачи в SMF и NZDSF для различных величин  $p_s$ . При этом  $A = -46$  дБ,  $N_F = 5,5$  дБ,  $l_{\text{пр}} = 100$  км,  $a_{\text{пр}} = 21$  дБ. Как видно из табл. 2, при скорости передачи 100 Гбит/с практически необходимо компенсировать дисперсию всего пролета как для SMF-, так и для NZDSF-волокон. Это приводит к резкому увеличению потерь в КД на DCF и соответствующему возрастанию коэффициента усиления усилителей. В связи с этим для компенсации дисперсии используются КД на ВБР ( $a_{\text{кд}} = 6$  дБ). Следовательно, коэффициент усиления EDFA  $g = 21 + 6 = 27$  дБ. Результаты расчета приведены в табл. 3.

Из этой таблицы видно, что число усилителей и длина секции резко зависят от уровня средней мощности на входе линейного тракта. Однако при больших значениях  $p_s$  возникают нелинейные явления в ОБ, что приводит к увеличению OSNR. Анализ технических данных усилителей EDFA различных фирм-производителей показывает, что чаще всего выбирается величина максимального уровня мощности на выходе усилителя  $p_s = (3-5)$  дБ в одном канале [6]. В общем случае уровень приема на входе регенератора:

$$p_R = p_s + a_{n+1}, \quad (7)$$

где  $a_{n+1}$  – потери в пролете, прилегающем к РЛ. Например, при  $p_s = 3$  дБ,  $l_{\text{пр}} = 100$  км, с учетом потерь в компенсаторе дисперсии,  $a_{\text{пр}} = g = 27$  дБ. Поэтому  $p_s = -24$  дБ. Полученный уровень должен удовлетворять соотношению  $p_R > p_{\text{мин}}$ . Что касается чувствительности РЛ  $p_{\text{мин}}$ , то ее величина зависит от типа РЛ (2R, 3R), его конструкции, фирмы-производителя, и

Таблица 3

$p_s$ , дБм	$n$	$L_c$ , км
7	6	700
5	4	500
3	2	300

Таблица 4

Чувствительность РЛ, дБм	-30	-26	-22	-18	-16
OSNR <sub>вх</sub> , дБм	16	18	22	26	27
OSNR <sub>вых</sub> , дБм	38	39	40	40	41

т.д. [2, 3]. Например, РЛ, разработанный в [2], характеризуется параметрами, измеренными в спектре 0,1 нм (12,5 ГГц), приведенными в табл. 4.

Как видно из этой таблицы, даже при чувствительности  $p_{\text{мин}} = 30$  дБм, регенерированный сигнал характеризуется высокой величиной OSNR=38 дБм, что соответствует  $P_{\text{ощ}} < 10^{-12}$ . Таким образом, подтверждается, что при скорости передачи 100 Гбит/с и  $p_s = 5$  дБм регенерационная секция длиной 500 км может содержать четыре оптических усилителя в каждом канале.

**Заключение.** В статье предложена гибридная ВОСП на три спектральных канала в диапазоне (1530 – 1565) нм. Причем в каждом спектральном канале организуется 10 цифровых каналов, и, следовательно, общая емкость системы составляет 30 цифровых каналов при скорости передачи 100 Гбит/с в каждом. Это обеспечивается установкой только трех регенераторов в секции, тогда как для системы DWDM требуется 30 регенераторов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Agrawal G. Fiber-Optic Communication Systems. – John Wiley, 1997. – 603 p.
2. Wolfson D. 40-Gb/s All-Optical Wavelength Conversion, Regeneration, and Demultiplexing in an SOA-Based All-Active Mach-Zehnder Interferometer (MZI) / D. Wolfson, A. Kloch, T. Fjelde etc. // IEEE Photonics Technology Letters. – 2000. – Vol. 12, №3. – P. 332–334.
3. Ficher St. All-Optical regenerative OTDM add-drop multiplexing at 40Gb/s Using Monolithic InP Mach-Zehnder Interferometer / St. Ficher, M. Dunk, E. Gamper // IEEE Photonics Technology Letters. – 2000. – Vol. 12, №3.
4. <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.Supp39-200310-S> (дата обращения 7.05.13).
5. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика: пер. с англ. – М.: Мир, 1996. – 323 с.
6. Заславский К.Е. Волоконно-оптические системы передачи со спектральным уплотнением: учеб. пособие / Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики. – Новосибирск, 2005. – 137 с.
7. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи. – М.: Техносфера, 2003. – 440 с.
8. Заславский К. Е., Шиянов В.А. Оптические компенсаторы дисперсии, использующие брегговские дифракционные решетки // Электросвязь. – 1999. – № 2. – С. 18–20.
9. Аппаратура волоконно-оптической системы передачи со спектральным разделением: РД 45.286-02: утв. Минсвязи РФ 29.08.02: введен в действие с 1.12.02. – М., 2002. – 19 с.
10. Трещиков В.Н. Разработки мирового уровня – залог успеха компании “Т8” // Фотон-экспресс. – 2012. – №8. – С. 8–9.

Получено 01.07.13.