

КАНАЛООБРАЗУЮЩАЯ АППАРАТУРА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ СО СПЕКТРАЛЬНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ КАНАЛОВ

С.В. Костарев, начальник Военной академии связи

Б.А. Лапшин, профессор ВАС, д.т.н.; balapshin@mail.ru

Г.В. Матвейкин, младший научный сотрудник НИЦ ВАС

***Ключевые слова:** волоконно-оптическая система передачи, цифровая система передачи, каналообразующая аппаратура, линейный тракт, коммутация оптических спектральных каналов, оптическая модуляция, волновой мультиплексор.*

Постановка задачи. Как известно, любые многоканальные системы передачи с частотным разделением каналов (МСП с ЧРК) имеют в своем составе каналообразующую аппаратуру (КОА) и оборудование линейного тракта (ОЛТ).

Существующие электрические МСП с ЧРК содержат КОА, обеспечивающую заданное количество стандартных каналов тональной частоты (КТЧ) и широкополосных каналов (ШК). Для переноса спектров сигналов всех КТЧ в групповой (N-канальный) линейный спектр частот существуют различные многоступенчатые варианты формирования линейного спектра со стандартными интервалами между соседними по частоте индивидуальными каналами (ИК) или группами каналов (ГК). С целью уменьшения количества типов преобразовательного оборудования и расширения номенклатуры частотных каналов с различной полосой передаваемых частот в современных типах КОА МСП с ЧРК предусмотрена следующая иерархия типовых и групп каналов: КТЧ с полосой пропускания 0,3...3,4 кГц; широкополосные каналы — ШК-48, ШК-240, ШК-1232, ШК-3862, где цифрами обозначаются полосы частот в кГц; первичная группа (ПГ) в составе 12 КТЧ с общим групповым спектром 60..108 кГц, соответствующим полосе пропускания 48 кГц; вторичная группа (ВГ) в составе 5 ПГ с общим спектром 312...552 кГц (с полосой пропускания 240 кГц); третичная группа (ТГ) в составе 5 ВГ с общим спектром 812..2044 кГц (с полосой пропускания 1232 кГц) и далее четверичная и пятиричная группы. Важным преимуществом иерархического построения КОА в МСП с ЧРК [1] является то, что в пределах каждого уровня иерархии каналы одинаковые, что позволяет значительно уменьшить количество типов применяемого на сети оборудования и упростить процесс коммутации типовых каналов.

Многоканальные системы передачи с временным разделением каналов (МСП с ВРК) также имеют иерархический принцип построения. Плезихронная цифровая иерархия (ПЦИ) базируется на трех стандартах, условно названных «европейским», «американским» и «японским». Европейский стандарт предусматривает следующие типовые цифровые каналы (ЦК): ОЦК — основной цифровой канал со скоростью передачи 64 кбит/с, ПЦК — первичный цифровой канал (2048 кбит/с), ВЦК — вторичный (8.448 кбит/с), ТЦК — третичный (34368 кбит/с), ЧЦК — четверичный (139264 кбит/с).

С появлением оптического волокна (ОВ) как новой направляющей среды с пропускной способностью в несколько Тбит/с была создана синхронная цифровая иерархия (СЦИ): СТМ-1 — синхронный транспортный модуль со скоростью передачи 155,52 Мбит/с, СТМ-4 — 622,08 Мбит/с; СТМ-16 — 2488,32 Мбит/с, СТМ-64 — 9953,28 Мбит/с, СТМ-16 — 39813,12 Мбит/с.

При передаче по ОВ двоичного цифрового сигнала со скоростью, например, 10 Гбит/с требуется [1] полоса пропускания порядка 30 ГГц, что составляет менее 1% от полосы пропускания в третьем окне прозрачности ОВ, равной порядка 4 ТГц. Такое расточительное использование ОВ привело разработчиков ВОСП к вполне обоснованному решению по разделению окна прозрачности ОВ на несколько спектральных каналов (СК). Так возник новый принцип построения ВОСП с разделением каналов (ВОСП-СР), известный в литературе как технология мультиплексирования по длине волны — МДВ (WDM — Wavelength Digital Multiplexing, CWDM, DWDM, HDWDM — соответственно разреженное, плотное и сверхплотное мультиплексирование).

Технология ВОСП-СР (или ВОСП с ЧРК) получила широкое распространение при создании волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) большой протяженности с использованием третьего окна прозрачности ОВ в диапазоне длин волн 1528..1565 нм, что соответствует частотному промежутку 192..196 ТГц.

Стандартом ИТУ-T установлены частотные планы, определяющие значения центральных частот СК в линейном спектре ВОСП-СР с шагом в 100, 50 ГГц, а в дальнейшем, с шагом 25 и 12,5 ГГц. С использованием волновых (частотных) мультиплексоров (ВМ) на основе оптических многослойных фильтров [7] задача получения узкополосных и широкополосных СК с заданной частотной характеристикой затухания (Чебышева, Баттерворта, Гаусса и т.п.) перестала быть проблемной и перешла в практическую плоскость. В настоящее время многие фирмы-изготовители предлагают широкую номенклатуру волновых мультиплексоров на 4, 8, 16, 32, 40, 64, 80, 100 и более СК. Тенденция к получению разнообразной многоканальности ВОСП-СР ставит на повестку дня вопрос о создании упорядоченной иерархии типовых спектральных каналов. Более того, сегодня все чаще проявляются противоречия между такими понятиями, как ЦСП и ВОСП-СР.

В составе современного цифрового оборудования стали применять терминальные мультиплексоры DWDM, множество входных интерфейсов, позволяющих объединять сети, построенные с использованием различных цифровых технологий, и повышать дальность связи, имея оптические

интерфейсы на выходах ЦСП. Все это действительно дает возможность построить систему связи с множеством преимуществ, однако сами ВОСП при этом теряют самостоятельность. Таким образом, дальнейшее развитие ВОСП-СР стало сдерживаться их тотальной зависимостью от ЦСП.

В то же время существуют проблемы, которые могут быть решены только в рамках автономности ВОСП-СР. На этапе создания полностью оптических сетей связи, устойчивых при работе в условиях телекоммуникационного противодействия, предъявляются жесткие требования к мобильности переконфигурации маршрутов передачи данных на оптическом уровне. А это, в свою очередь, требует полнодоступной коммутации оптических СК на узлах связи и в пунктах выделения. В современных ВОСП-СР для реализации полнодоступной коммутации всех оптических СК требуется большое количество вариантов преобразования частоты C , равное сочетанию из N по 2, т.е. $C_2^N = N(N-1)/2$. Так, при числе СК $N=40$ необходимо иметь $C_2^{40} = 40(40-1)/2 = 780$ вариантов преобразования частоты.

Такое построение ВОСП-СР порождает сложную проблему коммутации СК_{*i*} с различными длинами волн оптических несущих, где $i=1...N$. Для выполнения операций коммутации СК_{*i*} с различными полосами пропускания необходимо иметь специальное перестраиваемое оборудование, которое приводит два коммутируемых оптических СК к одинаковому спектру частот.

Приходится констатировать, что в окончательном оборудовании ВОСП-СР отсутствует КОА, нет типовых оптических СК с одинаковой полосой частот, которые можно было бы коммутировать без преобразования частоты. Несмотря на существование стандарта на расположение СК_{*i*} с одинаковым частотным шагом в спектре линейного тракта, указанные СК_{*i*} не являются типовыми (основными) каналами СК ВОСП-СР, как это имеет место, например, в электрических МСП с ЧРК (ЭМСП), где типовой КТЧ является по сути (по аналогии с ОЦК) основным аналоговым каналом (ОАК), например в таких системах передачи, как К-60П, К-1920, К-3600 и т.п.

Отсюда вытекает важный практический вывод: в состав ВОСП-СР необходимо ввести недостающее оборудование КОА. В этом случае ВОСП-СР с КОА становится самостоятельной оптической многоканальной системой передачи с частотным разделением каналов (ОМСП с ЧРК), а ЦСП по отношению к ОМСП будут выступать в роли вторичных систем передачи, работающих с заданной (допустимой) скоростью передачи по любому из типовых (в дальнейшем стандартных) СК.

Такое разделение систем передачи на два типа самостоятельных систем (первичные — ВОСП-СР и вторичные — ЦСП) позволит ускорить независимое совершенствование систем передачи с учетом специфических физических законов и наработанных практикой правил создания МСП с ЧРК (ВОСП-СР) и МСП с ВРК (ЦСП) [5].

Таким образом ВОСП-СР и ЦСП должны стать комплексами связи, не зависимыми друг от друга, и развиваться самостоятельно, но при этом обязательно учитывать их совместные функции по организации цифровых каналов электросвязи.

Особенности разработки каналообразующей аппаратуры ВОСП-СР сводятся к следующему:

- при модуляции оптического несущего колебания двойной последовательностью импульсов на выходе ОМ в частотной области появляется сложный сигнал, состоящий из оптического несущего колебания с частотой f_n и двух боковых

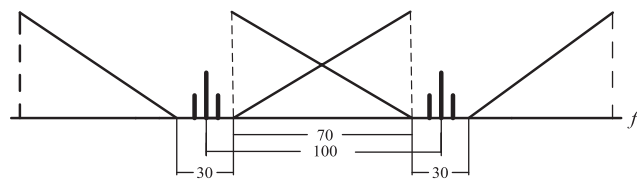


Рис. 1. Распределение частотного ресурса двух индивидуальных спектральных каналов (ИСК) с шагом 100 ГГц

вых колебаний. При передаче последовательности например со скоростью $V=10$ Гбит/с на частоте $f_n = 193,4$ ТГц частоты боковых колебаний на выходе ОМ $f_n \pm F_b = 193,4 \pm 0,01$ ТГц. В этом случае, для надежной передачи модулированного сигнала необходимо предусмотреть [1] полосу пропускания порядка (28..30) ГГц (рис. 1);

- поскольку средняя длина волны третьего окна прозрачности ОВ равна 1550 нм ($f_0 = 193,4$ ТГц) и большинство ЦСП, предназначенных для одноканальной работы по ОВ, имеют такие порты ввода/вывода, целесообразно в качестве средней частоты для всех основных спектральных каналов (ОСК) выбрать частоту, равную (близкую к) 193,4 ТГц;

- исследования пластинчатых волновых мультиплексов (ВМ) показали, что мощность мультиплексируемого сигнала, неоднократно отраженного от внутренних стенок пластинки ВМ, уменьшается тем больше, чем большее количество отражений он преодолевает. Поэтому, для исключения нежелательных потерь мощности сигналов, целесообразно использовать ВМ с малым количеством входов (три-пять) и одним выходом, а волновой демultipлексор (ВДМ), с одним входом и тремя-пятью выходами;

- поскольку построение цифровых иерархий связано с числом 4, выберем это число в качестве коэффициента и при построении иерархии СК в КОА ВОСП-СР. Сегодня количество ИСК с шагом 100 ГГц в ЛТ может быть равно 32, а в последующем, при использовании ОВ с улучшенными частотными характеристиками затухания и оптических усилителей (ОУ) с применением амплитудных корректоров [7] количество ОСК может быть увеличено до 64 и более;

- поскольку выпуск оптических излучателей широко освоен промышленностью для длин волн 1550, 1310 и 850 нм, целесообразно (желательно) сохранить эти длины волн и в качестве центральных (средних) длин волн для каналов различных уровней иерархии СК: 1550 нм для ОСК, 1310 нм для группового СК из четырех ОСК (ГСК-4) и 850 нм для группового СК из 16 ОСК (ГСК-16);

- поскольку линейный спектр ВОСП-СР будет формироваться на базе 16-канальных групп ГК-16, целесообразно в линейном спектре частот предусмотреть расширенные межканальные полосы между соседними групповыми спектрами ГК-16, что позволит, в свою очередь, снизить требования к затуханию разделительных фильтров в полосах «расфилтровки» и уменьшить количество слоев в их конструкциях;

- по аналогии с ЭМСП необходимо предусмотреть в ВОСП-СР (в ОМСП с ЧРК) создание служебного канала, в котором будут передаваться сигналы служебные, измерительные, телеконтроля, телеуправления и т.п. Служебный канал целесообразно разместить в середине линейного спектра на частоте $f_0=193,4$ ТГц (1550 нм) и назвать его нулевым ОСК (ОСК-0);

- расположение ИСК в линейном спектре должно отвечать требованиям стандарта ITU-T G-692, которым предусматривается чередование несущих частот через 100 ГГц,

С учетом изложенных требований, которые в процессе обсуждения могут быть изменены или скорректированы, на

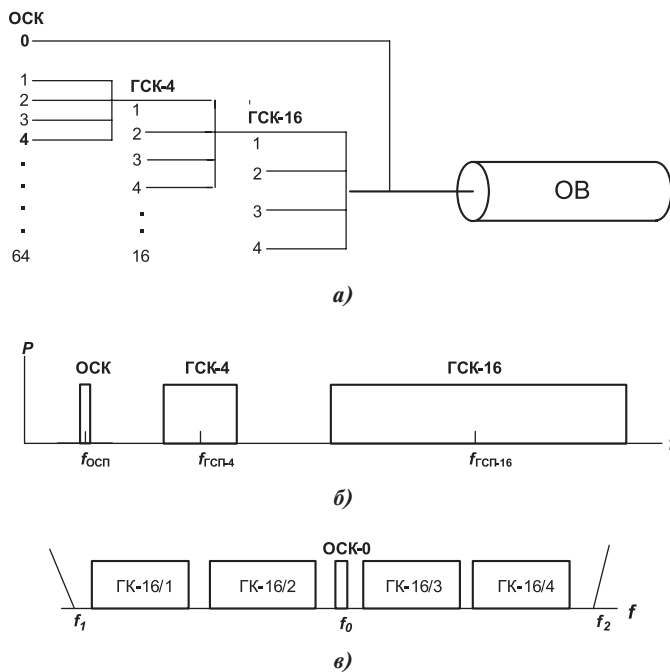


Рис. 2. Принцип формирования спектра частот оптических СК в КОА (а); расположение спектров типовых СК на оси частот (б); линейный спектр ВОСП-СР с 64 СК (в)

рис. 2, а представлен вариант формирования иерархии оптических типовых СК в КОА ВОСП-СР на 64 ОСК с шагом 100 ГГц,

На рис. 2, б показано расположение спектральных каналов на оси частот со средними частотами $f_{оск}$, $f_{гск-4}$ и $f_{гск-16}$. На рис. 2, в приведен линейный спектр ВОСП-СР в режиме разделения третьего окна прозрачности ОБ на 64 СК, и один ОСК-0.

Из рис. 2, а видно, что со станционной стороны КОА ВОСП-СР имеет порты ввода/вывода для 64 ОСК с одинаковыми параметрами, что позволяет подключать их к общему коммутационному полю оптического коммутатора, например MEMS (micro – electromechanical system) – микроэлектромеханическая система коммутации, и осуществлять автоматическую коммутацию каждого из 64-х ОСК одной ОМСП с каждым из 64-х ОСК второй (третьей и т.д.) ОМСП. В свою очередь к каждому ОСК может быть подключена ЦСП с любой скоростью передачи двоичных импульсов не выше 10 Гбит/с, к каждому ГСК-4 – не выше 40 Гбит/с, к каждому ГСК-16 – не выше 160 Гбит/с.

Преимущества ВОСП-СР с КОА.

1. ВОСП-СР с собственной КОА приобретает статус самостоятельной, полностью оптической многоканальной системы передачи, имеющей собственные типовые спектральные каналы, параметры которых не зависят от вида передаваемых по ним сигналов.

2. Все типовые каналы ОМСП с ЧРК, по аналогии с ЭМСП с ЧРК, должны нормироваться как оптические спектральные каналы с заданными параметрами: полоса частот, уровни передачи и приема, остаточное затухание, частотные характеристики затухания, фазы (или ГВП), амплитудная характеристика, уровень шума и др.

3. Подключаемые к входам спектральных каналов сигналообразующие системы передачи (например ЦСП) по отношению к ВОСП-СР должны иметь статус вторичных СП, и параметры их интерфейсов должны учитывать требования,

предъявляемые типовыми СК к подключаемой аппаратуре.

4. Линейный тракт содержит пункты с линейными усилителями, в состав которых входят корректоры амплитудных и фазовых искажений, где могут быть организованы пункты выделения (транзита) любого количества типовых СК.

5. В ВОСП-СР с КОА отпадает необходимость: в синхронизации; в перестройке волновых мультиплексоров ввода/вывода типа ROADM (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexing); в оборудовании жесткой конфигурации мультиплексоров ввода/вывода типа OADM (Optical Add/Drop Multiplexer, OADM), где коммутация оптических каналов производится вручную.

6. Создание КОА ВОСП-СР на 32 или 64 ОСК обеспечивает высокую степень унификации оборудования, характеризующейся следующими показателями: количество типов оптических преобразователей частоты (ОПЧ) $N_{опч}=12$; оптических многослойных фильтров (ОМСФ) – $N_{омсф}=14$; волновых мультиплексоров (демультиплексоров) – $N_{вм}=3$.

Технические вопросы, требующие решения. Исторически сложилось, что вопросами создания систем передачи информации по оптическому волокну первыми стали заниматься оптики, которые решали практические задачи по мере их возникновения, и каждый практический результат рассматривался как факт, подтверждающий теоретические выводы о широких возможностях передачи сигналов по оптическому волокну с помощью света. Широкое развитие ВОСП ставит новые задачи, причем задачи другого плана, связанные с такими проблемами как увеличение дальности связи и пропускной способности ОБ, маршрутизация потоков информации, автоматизация коммутации СК, повышение устойчивости связи в условиях телекоммуникационного противоборства и т.п.. На повестке дня стоит задача создания полностью оптических транспортных сетей с использованием широкополосных оптических усилителей в линейных трактах, с возможностью выделения и коммутации типовых СК на оконечных и промежуточных пунктах без преобразования частот. Эти задачи относятся к компетенции специалистов по схемотехнике. И здесь, наряду с достижениями оптиков, должен быть востребован опыт связистов, организующих непрерывную и эффективную эксплуатацию волоконно-оптической техники, комплексов, систем и сетей связи.

В связи с этим возникает ряд задач, решение которых требует создания КОА, обеспечивающей перевод современных образцов ВОСП-СР на уровень независимых, самостоятельных, полностью оптических многоканальных систем передачи – ОМСП с ЧРК. Ниже приводится далеко не полный перечень основных задач, решение которых, по мнению авторов, требует совместного участия специалистов различных научных направлений, связанных с созданием волоконно-оптических систем связи: физиков, химиков, технологов, математиков и, в первую очередь (на данном этапе), связистов (схемотехников):

- построение оптимальной иерархии спектральных каналов в соответствии с критерием применения минимума типов оборудования и минимума операций преобразования спектров частот в КОА ВОСП-СР;
- исследование возможности создания многочастотных генераторов нескольких оптических несущих колебаний с общим задающим генератором;
- разработка оптических преобразователей частоты класса О-О для переноса оптического группового сигнала из одного диапазона частот в другой;

- создание универсальных волновых мультиплексоров с минимальными потерями и минимальными взаимными влияниями между соседними каналами;
- разработка аналитических методов расчета и технологии автоматизированного производства оптических многослойных фильтров как основы (вместе с волновыми мультиплексорами) технологии DWDM, с заданными частотными характеристиками затухания и с заданными (реализуемыми) показателями преломления в материалах слоев;
- разработка системы АРУ в каждом из СК;
- разработка системы коррекции АЧХ и ФЧХ спектральных каналов и линейного тракта;
- построение системы автоматической коммутации оптических типовых каналов для различных уровней иерархии СК;
- разработка автоматической контрольно-измерительной аппаратуры для непрерывного контроля качества СК (по аналогии с КСАУСС, используемой для контроля качества КТЧ ЭМСП с ЧРК [2]).

Авторы надеются, что широкое обсуждение на страницах журнала направлений дальнейшего совершенствования ВОСП-СР позволит решить целый ряд практических (и организационных) вопросов, связанных с созданием

отечественных конкурентоспособных ОМСП с ЧРК нового поколения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Арасланкин И.Ф., Лапшин Б.А., Макаренко А.Я.** Многоканальные системы передачи. Сети связи и аналоговые системы передачи – СПб.: ВАС, 2007. – 672 с.
2. **Исаков Е.Е.** Устойчивость военной связи в условиях информационного противоборства – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 400 с.
3. **Фриман Р.** Волоконно-оптические системы связи. Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 2003. – 440 с.
4. **Фокин В.Г.** Оптические системы передачи и транспортные сети. – М.: Эко-Тренд, 2008. – 288 с.
5. **Меккель А.М.** Полностью оптическая транспортная сеть в современных рекомендациях МСЭ-T//T-Comm–Телекоммуникации и транспорт. – 2008. – № 8. – С. 22.
6. **Скляр О.К.** Волоконно-оптические сети и системы связи. – СПб.: Лань, 2010. – 272 с.
7. **Лапшин Б.А.** Оптические гетероструктуры. Новая теория и расчет. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 480 с.
8. **Костарев С.В., Лапшин Б.А., Матвейкин Г.В.** Авторская заявка на изобретение: Многоканальный управляемый оптический мультиплексор ввода-вывода. № 2012133045 от 1.08.2012

Получено 10.12.12.